NOVIEMBRE 2009

INVESTIGACION Y CIENCIA



Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

GALILEO
Del telescopio primitivo a la cosmología moderna

ARQUEOLOGIA
Explosiones de ingenio en la Edad de Piedra

COGNICION
Bases de la inteligencia humana

BIOLOGIA
De la materia inerte a la vida

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

NUMERO MONOGRAFICO
ORIGENES

Causas, principios y eclosiones

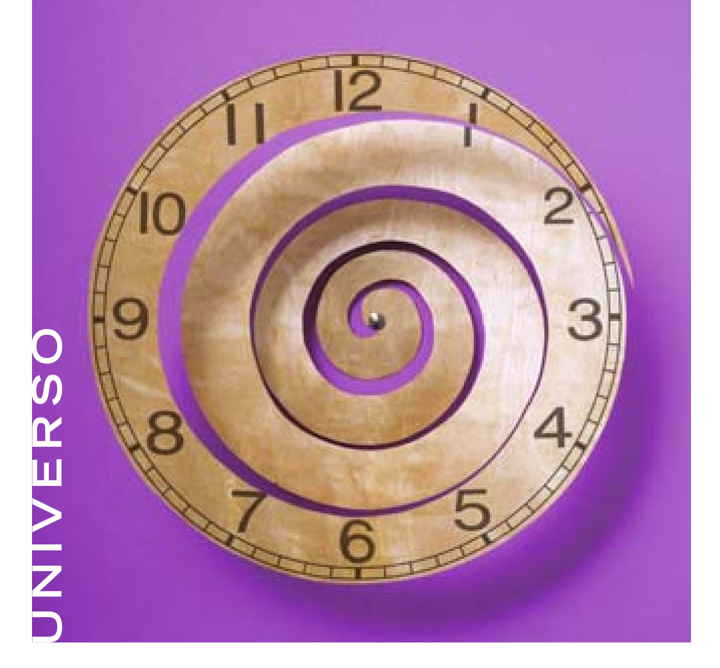


SUMARIO

Noviembre de 2009/ Número 398



ARTICULOS

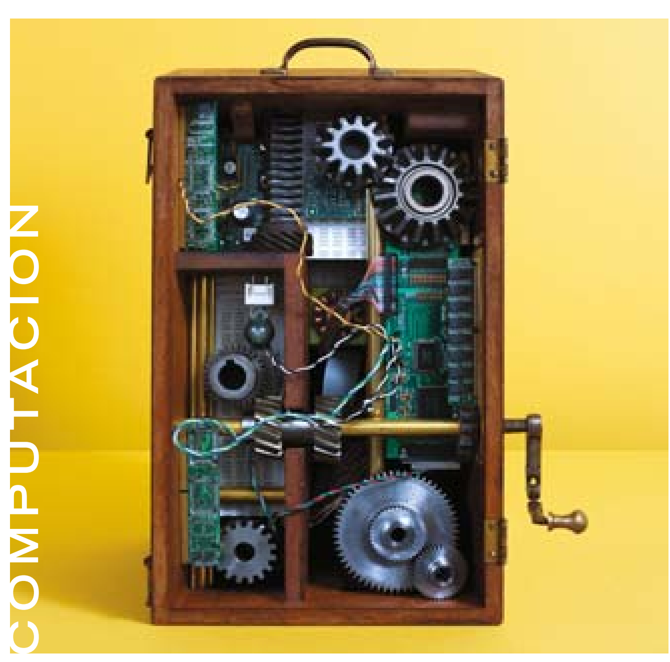






SECCIONES





INVESTIGACION
Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
ACTING EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, Michael Moyer, George Musser, Christine Soares, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Stuart F. Brown, W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Christie Nicholson, Michelle Press, John Rennie, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin Hause
VICE PRESIDENT, OPERATIONS AND ADMINISTRATION Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid) - Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª 08021 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *El origen del universo*; Teodoro Vives: *El origen galileano de la cosmología moderna*; Juan Manuel González Mañas: *El origen de la vida*; Luis Bou: *El origen de la mente*, *Apuntes*; Carlos Lorenzo: *El origen de la cultura humana*; J. Vilardell: *Hace*, *Apuntes...*; Anna Ferran: *Apuntes*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: © iStockphoto / STOUPA (*huevo*), Investigación y Ciencia (*fotomontaje*)

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Printer Industria Gráfica Ctra. N-II, km 600 - 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Crecimiento nervioso. «Los médicos ya no animan a los pacientes con un nervio facial regenerado a recuperar el control de la expresión facial mediante ejercicios; hoy aconsejan inhibir por completo la expresión, practicar la 'cara de póquer', al objeto de que ambas mitades del rostro presenten la misma apariencia. Las perspectivas son igualmente poco prometedoras para la restauración de la coordinación en los casos de lesiones nerviosas graves en otras partes del cuerpo. Este nuevo punto de vista refleja la revisión que se ha efectuado de la idea que tenemos del sistema nervioso en su conjunto. Según la nueva concepción, las conexiones necesarias para la coordinación normal se forman durante el desarrollo embrionario. —R. W. Sperry»

[NOTA: Roger W. Sperry ganó el premio Nobel de medicina de 1981.]

El primer herramentista. «En la Garganta de Olduvai (Tanganica), L. S. B. Leakey ha descubierto, casi intacto, un cráneo que podría corresponder 'al eslabón entre el primate u hombre-mono surafricano, *Australopithecus* y *Paranthropus*, y el hombre genuino tal como lo conocemos hoy'. Cree Leakey que la edad de su hallazgo se sitúa entre 600.000 y un millón de años. Si esa estimación es confirmada por las pruebas de datación radiactiva que se efectuarán próximamente en la Universidad de California, el cráneo sería el más antiguo de los descubiertos hasta ahora del hombre fabricante de herramientas. Según Leakey, el cráneo es en algunos aspectos (sus largos dientes —que propiciaron el apodo de 'hombre cascanueces'— y su paladar) más primitivo que el del *Australopithecus*, pero en otros está más cerca del *Homo sapiens*.»

[NOTA: Finalmente, el fósil fue clasificado como *Paranthropus boisei*.]

...cien años

Anquilostoma. «El millón de dólares donados por John D. Rockefeller contribuirán en gran medida a la erradicación del anquilostoma. Este gusano fue identificado en 1903 por el doctor Charles Wardell Stiles, de la Comisión Rockefeller. La contaminación de los suelos es la responsable de su existencia y proliferación. Del cuerpo humano puede eliminarse mediante un sencillo tratamiento con timol y sulfato de magnesio, lo que sana a la mayoría de los pacientes en cosa de días. Las personas atacadas por el anquilostoma presentan como síntoma principal una anemia muy acusada, acompañada de emaciación y una gran debilidad física; les provoca también pereza, lasitud mental y estupidez. El nombre técnico de la enfermedad es uncinariasis; su causa se desconocía hasta mediado el siglo XIX.»

El negocio del hielo. «Las tres cuartas partes del hielo que se consume en Francia es artificial. Hace quince años aún se enviaban a París, vía Dieppe, cantidades considerables de hielo noruego. Hoy ese comercio ha desparecido casi por completo; el hielo noruego se emplea sólo en las ciudades costeras o cercanas al litoral. En Francia, el consumo anual de hielo para refrigeración sube a 200.000 toneladas, de las que 150.000 son de manufactura. El hielo natural no es saludable, pues la mayoría de los microorganismos resisten temperaturas entre –50 y –110 grados Celsius. A instancias de la junta de sanidad de Paris, el prefecto del Sena publicó una ordenanza que limitaba el uso del hielo natural a los establecimientos industriales y admitía como 'apto para el consumo humano' sólo el hielo artificial elaborado con agua esterilizada o con agua del abastecimiento urbano.»

Barco con molinos de viento. «Un barco propulsado por molinos de viento es ciertamente una curiosidad mecánica [*véase ilustración*]. Sin embargo, por qué tan complicado dispositivo de engranajes cónicos que conectan el árbol de la hélice con los árboles verticales de los molinos de viento debe ser superior a las velas de lona es algo que supera nuestra imaginación.»

...ciento cincuenta años

Los primeros pozos de petróleo. «Noticia reciente sobre el petróleo de Pennsylvania: en la mayoría de los condados, la extracción de aceite combustible a partir de sustancias minerales, como el coral o el asfalto, requiere un proceso de gran complejidad; pero Pennsylvania parece haber sido tan favorablemente tratada por Doña Naturaleza que las mismas rocas le destilan el aceite en el regazo. La parte noroccidental de ese estado parece albergar un gran número de manantiales subterráneos que dan un petróleo límpido, algunos de los cuales hemos examinado; en fecha muy reciente hubo una gran conmoción a causa del descubrimiento de un generoso manantial de petróleo cuando se perforaba en busca de una fuente salina. La producción del pozo de petróleo Séneca, cercano a Titusville, ascendía, hasta el último incendio, a más de 6000 litros diarios. El entusiasmo no mengua.»

VELERO SIN VELAS, un diseño demasiado complicado de 1909

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CI, N.º 19; 6 DE NOVIEMBRE DE 1909

FOTOSINTESIS

Debemos su invención a los antepasados de las cianobacterias

Cuando el sol brilla, las plantas verdes descomponen el agua para obtener electrones y protones, utilizar esas partículas para convertir el dióxido de carbono en glucosa y desprender oxígeno como producto residual. Ese proceso es de lejos el más complejo y extendido de todas las versiones conocidas de la fotosíntesis, que transforman la luz de determinadas longitudes de onda en energía química. (Las investigaciones han apuntado que ciertos hongos unicelulares utilizan rayos gamma de alta energía: se han hallado colonias de estos hongos desarrollándose en el interior de un reactor nuclear fundido en el accidente de Chernobil.) La utilización del agua como reactivo de la fotosíntesis, en lugar de otras sustancias más escasas, como el ácido sulfhídrico, permitió que, andando el tiempo, la vida surgiera y prosperara en cada rincón del planeta.

La fotosíntesis basada en la descomposición del agua fue "inventada" por los antepasados de las actuales cianobacterias, también conocidas como algas cianofíceas o verdeazuladas. Los organismos que hoy realizan ese tipo de fotosíntesis, incluidas las plantas, las algas verdes y por lo menos un animal (la babosa marina *Elysia chlorotica*), poseen cloroplastos, orgánulos que parecen provenir de lo que en el pasado eran cianobacterias simbióticas. Todos emplean alguna forma del pigmento clorofila, a veces en combinación con otros pigmentos. La fotosíntesis empieza cuando una serie de moléculas de clorofila absorbe un fotón y dirige la energía de éste hacia la escisión de moléculas de agua.

Pero el agua es una molécula excepcionalmente resistente para intervenir en la fotosíntesis. Obtener los electrones del agua y dotarles de energía suficiente para sintetizar glucosa exige la participación de dos grupos independientes de moléculas de clorofila ligeramente distintas (y un sistema de más de 100 tipos de proteínas). Las formas más simples de fotosíntesis utilizan uno u otro grupo, pero no ambos. El misterio es: ¿cuál de ellos apareció primero en la evolución y cómo terminaron combinándose? "Es una pregunta para la que no tenemos respuesta", afirma Robert Blankenship, de la Universidad de Washington en San Luis.

Los científicos ignoran también cuándo aprendieron las cianobacterias a descomponer el agua. Algunos datos sugieren que posiblemente ya lo hicieran hace 3200 millones de años. Sin duda, la reacción sucedía hace al menos 2400 años, cuando el oxígeno pasó de ser un gas inusual a representar el segundo más abundante de la atmósfera, un cambio sin el cual nunca habrían existido animales multicelulares complejos con capacidad de formular preguntas científicas.

—Davide Castelvecchi

LA RED

Un recurso global que emanó de la investigación en física fundamental

Cuando Tim Berners-Lee esbozó lo que ahora se conoce como la "World Wide Web", la ofreció para resolver los problemas que plantea la documentación. En 1989, este informático se hallaba trabajando en el CERN, precisamente cuando uno de sus principales proyectos, el Gran Colisionador Electrón-Positrón, estaba entrando en servicio. En aquel tiempo, el CERN constituía una de las grandes sedes de Internet de Europa y hogar de millares de científicos que utilizaban una variedad de sistemas informáticos. La información se almacenaba de forma jerárquica: un repositorio central, dendriforme, contenía documentos en las extremidades de las ramas. Para localizar un archivo era necesario trepar por el tronco y dirigirse luego a la rama adecuada.

Los científicos que iban llegando al CERN (que eran muchos, pues la mayoría permanecía durante períodos breves, de unos dos años) pasaban malos ratos tratando de averiguar las ramas por las que debían aventurarse para obtener la información adecuada para su proyecto.

Berners-Lee, en una propuesta a la dirección del CERN en marzo de aquel año, sugirió la construcción de un sistema que operase de forma más parecida a la estructura de la propia organización: "Una 'telaraña' múltiplemente conectada, cuyas interconexiones evolucionasen con el tiempo", escribió en *Information Management: A Proposal*. La información ya no se almacenaría en árboles jerárquicos; se crearía un bosque de nodos interconectados. "Cuando se describe un sistema complejo es frecuente recurrir a diagramas con círculos y flechas... El sistema que necesitamos viene a ser un diagrama de círculos y flechas, en el que los círculos y las flechas pueden representar cualquier cosa".

Esa indiferencia en cuanto a los contenidos ha proporcionado a la Red su potencia actual. El sistema que Berners-Lee concluyó en las navidades de 1990 estaba imbuido de versatilidad en todos los niveles: cualquier archivo se identificaba por una dirección específica, su localizador uniforme de recurso o URL (de "Uniform Resource Locator"). Entre bastidores, el protocolo de transferencia de hipertexto, o HTTP (de "Hypertext Transfer Protocol"), proporcionaba un lenguaje uniforme, apto para que los diferentes tipos de sistemas informáticos se comunicasen entre sí. Un sencillo lenguaje de anotación de hipertexto, el HTML (de "Hypertext Markup Language"), vinculaba los documentos entre sí y especificaba el aspecto que deberían tener. Y algo no menos importante: los componentes fueron puestos sin coste a disposición de quien los quisiera. Dos decenios después, la WWW ha demostrado ser la plataforma más eficaz para la diseminación de información jamás creada.

—Michael Moyer

VINCENZO LOMBARDO *Getty Images*

RELOJES

Su origen es una de las cuestiones de mayor calado de la física moderna

Los relojes de sol y los de agua son tan viejos como la civilización. Los relojes mecánicos se remontan a la Europa del siglo XIII. Pero aquellos artefactos nada hacían que la naturaleza no hiciera ya. La Tierra es un reloj porque gira. La mitosis celular es un reloj. Los isótopos radiactivos son relojes. Dicho de otro modo, el origen de los relojes no es un tema de historia, sino de física. Y con ello empiezan los problemas.

Podría creerse, inocentemente, que un reloj es un objeto que nos da la hora, pero según los dos pilares básicos de la física moderna el tiempo cronológico no es algo que pueda medirse. La teoría cuántica describe cómo cambia el mundo en función del tiempo. Nosotros observamos esos cambios e inferimos el paso del tiempo, pero en sí el tiempo es intangible. La teoría de la relatividad general de Einstein va más allá y afirma que el tiempo carece de significación objetiva. De hecho, el mundo no cambia con el tiempo: es un gigantesco reloj parado. Tan extravagante revelación se conoce como problema de la congelación del tiempo o, sencillamente, problema del tiempo.

Si los relojes no informan del tiempo, ¿de qué informan? Lo que nosotros percibimos como "cambio" no es una variación con el tiempo, sino un patrón que crean los componentes del universo; el hecho, por ejemplo, de que cuando la Tierra ocupa una cierta posición en su órbita, los demás planetas ocupen otras posiciones concretas en las suyas. Julian Barbour desarrolló esa visión relacional del tiempo en el trabajo que resultó ganador en 2008 del concurso de ensayos del Instituto de Cuestiones Fundamentales.

Sostiene Barbour que, a causa de los patrones cósmicos, cada pieza del universo es un microcosmos del total. Podemos emplear la órbita de la Tierra como referencia para reconstruir la posición de los otros planetas. En otras palabras, la órbita de la Tierra sirve como reloj. No informa del tiempo, sino de las posiciones de los demás planetas. Según razona Barbour, todos los relojes son aproximativos; ninguna pieza de un sistema es capaz por sí sola de captar la totalidad del conjunto. Todo reloj antes o después pierde un batido, retrocede o se agarrota. El único reloj genuino es el mismo universo. En cierto sentido, los relojes carecen de origen. Siempre han estado aquí. Son ellos los que hacen posible que haya una idea de "origen".

—George Musser

PATAS, PIES Y DEDOS

No evolucionaron en tierra firme, sino en el agua

La evolución de los animales terrestres a partir de los peces acuáticos con aletas quizás empezara con la necesidad de respirar aire puro. Los animales que tienen cuatro extremidades que terminan en dedos —los tetrápodos ("con cuatro pies")— aparecieron hace entre 380 millones y 375 millones de años. Se creía que las extremidades evolucionaron como una adaptación a la vida en tierra firme. Pero descubrimientos recientes han revelado que algunos de los cambios fundamentales en la transición de la aleta a la extremidad sucedieron cuando los antepasados de los tetrápodos habitaban todavía en el agua.

Jennifer Clack, de la Universidad de Cambridge, y otros expertos en la evolución de los tetrápodos plantean la hipótesis de que esas modificaciones tempranas en los huesos y superficies articulares de las aletas pectorales podrían haber beneficiado a los antepasados de los tetrápodos de dos maneras principales.

Primero, permitiendo que tales moradores de aguas superficiales atestadas de plantas pudieran levantarse para sacar la cabeza fuera de las aguas poco oxigenadas y tomar una bocanada de aire. (Los cambios en otras partes del esqueleto, como el cráneo y el cuello, facilitaron también la respiración del aire.) Las extremidades primitivas pudieron haberles ayudado a avanzar por el fondo o a mantenerse quietos frente a la corriente mientras esperaban atrapar alguna presa por sorpresa.

En el pasado se pensaba que los huesos que formaban los pies y los dedos constituían una innovación evolutiva propia de los tetrápodos. Pero en los últimos años, los análisis de los precursores de los tetrápodos, como el fósil de *Tiktaalik*, descubierto en el 2006, han revelado que esos huesos derivaron directamente de los huesos de las aletas de los peces. Curiosamente, los primeros tetrápodos y peces parecidos a tetrápodos poseían pies con seis, siete u ocho dedos, en lugar de los cinco que presentan los tetrápodos actuales. El motivo por el que los tetrápodos desarrollaran finalmente cinco dedos es incierto, pero es posible que esta configuración ofreciera a la articulación del tobillo la estabilidad y flexibilidad necesarias para caminar.

—Kate Wong



RAUL MARTIN

ESTRIBOS

La invención del estribo cambió el arte de la guerra

Una leve alteración en el modo habitual de montar a caballo alteró la forma en que se combatía en las guerras. Cuando domesticaron el caballo, miles de años tras el alba de la agricultura, los humanos empezaron montando a pelo o con una manta sobre el lomo del animal. La primera silla de cuero quizá se puso a lomos de un caballo en la China del siglo III a.C. Pero la silla de montar fue sólo un primer paso hacia la transformación de la caballería. Subirse a un caballo acarreando sobre sí unas armas presentó durante mucho tiempo azarosos peligros. Cambises II, rey de Persia en el siglo VI a.C., se acuchilló a sí mismo al saltar sobre un caballo.

Hacia el siglo IV d.C., los chinos ya habían empezado a construir apoyos de hierro fundido o de bronce para los pies. Lo que hizo del estribo una innovación de tal trascendencia fue que facilitó al jinete un control mucho mayor del caballo; jinete y animal se convirtieron casi en extensiones el uno del otro. Se hizo posible disparar flechas con precisión desde un caballo lanzado a galope tendido. Un soldado de caballería podía afirmarse en la silla y, con la lanza sujeta bajo el brazo, valerse de la tremenda energía cinética de un caballo a la carga para abatir a un enemigo aturdido por la sorpresa. La pura masa del caballo y su rapidez se convirtieron en elementos importantes del arma de caballería, y en un potente factor de intimidación.

Es posible que los ávaros trajesen el estribo a Occidente cuando llegaron al Imperio Bizantino en el siglo VI d.C. El Imperio Bizantino no tardó en adoptarlo, y después también los francos. Hace decenios que las repercusiones sociales de la montura equina intrigan a los historiadores. Algunos estudiosos sugirieron que el feudalismo surgió en Europa porque la guerra a caballo, facilitada por el estribo, resultó beneficiosa para la caballería franca. Surgió así una clase aristocrática que recibió tierras en pago a sus servicios en la caballería.

Otros, en el bando contrario de lo que se conoce como la Gran Controversia sobre los Estribos, sostienen que esa interpretación de los hechos carece de base. Que el estribo fuese la sola técnica que permitió el auge del feudalismo es más que dudoso. Pero lo que es incuestionable es que ese pequeño aditamento a la silla de montar fue una innovación que transformó para siempre el arte de la guerra.

—*Gary Stix*

EL OJO

¿Para qué sirve la mitad de un ojo? Para muchas cosas

Un argumento favorito de los creacionistas a ultranza es que un órgano tan complejo como el ojo humano (provisto de iris regulador de la luz, cristalino, retina estratificada de células fotosensibles y otros elementos) no puede ser resultado de la evolución darwinista. ¿Cómo podrían unas mutaciones aleatorias haber creado y ensamblado de forma espontánea unas partes carentes de finalidad por sí mismas? "¿De qué sirve la mitad de un ojo?", ironizan, pretendiendo que este órgano constituya una prueba evidente de la intervención directa de Dios.

De hecho, hasta Charles Darwin reconoció en *El Origen de las Especies* que el ojo parecía plantear una objeción a su teoría. Sin embargo, al examinar el registro fósil, las etapas de desarrollo embrionario y los diversos tipos de ojos en los animales existentes, los biólogos de la escuela de Darwin han señalado las sucesivas etapas de la evolución que pueden haber dado lugar al ojo que conocemos hoy.

La estructura básica de nuestros ojos es similar en todos los vertebrados, lampreas incluidas, cuyos antepasados se separaron de los nuestros hace unos 500 millones de años. Por aquel entonces, pues, todos los caracteres básicos del ojo tenían que existir, afirma Trevor Lamb, de la Universidad Nacional Australiana. Pero los vertebrados que siguen a las lampreas en afinidad, los resbaladizos mixinos (de cráneo cartilaginoso y sin ningún otro hueso), están dotados sólo de ojos rudimentarios: unas estructuras cónicas bajo la piel, sin córnea, ni cristalino ni músculos, cuya función probablemente se limita a medir la luz ambiente en los profundos y fangosos lechos marinos donde medran estos peces agnatos.

Es, por tanto, verosímil que nuestros ojos hayan evolucionado tras haber divergido nuestra ascendencia y la de los mixinos, tal vez hace 550 millones de años según Lamb. Los animales más primitivos acaso contaran con células fotosensibles implantadas en el cerebro para distinguir la luz de la oscuridad y la noche del día. Si esos implantes se hubiesen reestructurado formando vesículas, como en el caso de los mixinos, podrían haber localizado la dirección de procedencia de la luz. Las pequeñas mejoras siguientes habrían permitido visualizar imágenes toscas, como las que perciben los ojos del molusco nautilo. El cristalino sería el resultado de la evolución de capas de piel transparente engrosada. Lo esencial es que, en cada etapa, el ojo "incompleto" tuviera posibilidades de sobrevivir a sus antecesores.

Los biólogos han calculado que todos esos cambios podrían haber ocurrido en sólo 100.000 generaciones, un abrir y cerrar de ojos en términos geológicos. Quizás era preciso evolucionar con tal prontitud, puesto que numerosos invertebrados estaban desarrollando sus tipos de ojos particulares. Según Lamb, se trataba de una auténtica carrera de armamentos: "en cuanto otros adquirían visión y empezaban a devorarte, lo importante era poder escapar de ellos".

—*Davide Castelvecchi*



GETTY IMAGES (*arriba*); FABRICE LEROUGE *Getty Images* (*abajo*)

CARBONO

Sinónimo de vida, se originó en el interior de las estrellas

Aunque el carbono haya adquirido mala fama en los últimos tiempos porque se asocia a los gases de efecto invernadero, fue, durante mucho tiempo, sinónimo de vida. Después de todo, el término "vida orgánica", basada en el carbono, se utiliza a menudo para referirse a "la vida tal y como se conoce"; asimismo, un "compuesto orgánico" significa un "compuesto de carbono", aunque no intervenga en él ningún ser vivo.

Pero el sexto elemento de la tabla periódica —y el cuarto más abundante del universo— no ha existido desde el inicio del tiempo. Durante la gran explosión ("Big Bang") se formaron sólo hidrógeno, helio y trazas de litio. El resto de los elementos, entre ellos el carbono, se creó más tarde, sobre todo mediante la fusión nuclear en el interior de las estrellas y las explosiones de las supernovas.

A las temperaturas y presiones extraordinariamente elevadas del centro de una estrella, los núcleos atómicos chocan entre sí y se fusionan, dando lugar a otros núcleos de mayor peso. En una estrella joven, la mayor parte corresponde a hidrógeno que se fusiona y se convierte en helio. La unión de dos núcleos de helio (cada uno con dos protones y dos neutrones) forma un núcleo de berilio, que tiene cuatro protones y cuatro neutrones. Sin embargo, ese isótopo de berilio, inestable, tiende a desintegrarse muy poco después. De ese modo, parecería imposible la formación de carbono u otros elementos más pesados.

Mas, avanzada la vida de la estrella, la temperatura interna se eleva por encima de los 100 millones de kelvin. Sólo entonces se produce berilio con prontitud suficiente para sumar una cantidad importante de ese elemento en un momento dado; surge así la posibilidad de que otros núcleos de helio choquen contra los de berilio y se origine carbono. Después, pueden producirse más reacciones, que dan lugar a otros elementos de la tabla periódica, hasta el hierro.

Cuando en el centro de una estrella se agotan los núcleos que se fusionan, remite la presión hacia fuera ejercida por la reacción de fusión nuclear; la estrella colapsa bajo su propio peso. Si la estrella presenta el tamaño suficiente, provocará uno de los resplandores más espectaculares del universo: una explosión de supernova. Tales cataclismos resultan beneficiosos, ya que las supernovas permiten dispersar el carbono y otros elementos (algunos de ellos originados en las mismas explosiones) por la galaxia, donde darán lugar a nuevas estrellas y también a planetas, vida... y gases de efecto invernadero.

—*Davide Castelvecchi*

HUEVO

El viejo dilema del huevo y la gallina

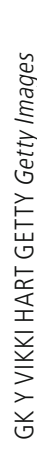
En marzo de 2006, con ocasión de la publicación de la película *Chicken Little* en DVD, Disney convocó un panel de expertos para dar una respuesta definitiva al antiguo enigma: ¿Qué fue antes, el huevo o la gallina? El veredicto fue unánime. "La primera gallina tuvo que diferenciarse de sus padres en algún cambio genético, que hizo que esta ave fuera la primera en cumplir los criterios por los que juzgamos que un animal es una gallina", afirmó John Brookfield, especialista en biología evolutiva de la Universidad de Nottingham. "El organismo viviente dentro de la cáscara de huevo tenía el mismo ADN que la gallina en la que se iba a convertir; por tanto, era miembro de esa misma especie". Lo que reconocemos como el ADN de una gallina existe primero dentro de un huevo. El huevo vino primero.

Sin embargo, a pesar de la postura unánime de aquel panel, compuesto por tres personas (ya que David Papineau, filósofo de la ciencia, y Charles Bourns, granjero avícola, estuvieron fundamentalmente de acuerdo con el análisis de Brookfield), la pregunta es, en el mejor de los casos, incompleta, y en el peor, engañosa. Si consideramos que la palabra "gallina" se refiere a un miembro de *Gallus gallus domesticus* (una subespecie de aves salvajes que evolucionó en el sudeste asiático y lleva domesticada unos 10.000 años), podríamos preguntarnos en qué momento apareció el primer miembro de esta especie (y si era un animal adulto o un huevo).

La formación de una especie no es un proceso que se lleve a cabo en un instante ni en un individuo. Se precisan generaciones y generaciones de cambios graduales para que un grupo de animales deje de cruzarse con otro grupo, y sólo entonces puede afirmarse que se ha formado una nueva especie. Visto de esta forma, no tiene sentido hablar del primer huevo o la primera gallina. Sólo existió el primer grupo de gallinas, algunas de las cuales, es de suponer, aún eran huevos.

Y, si no se exige que se trate de la misma especie, el huevo va muy por delante. Algunos invertebrados tan simples como las esponjas se reproducen mediante algún tipo de huevos, lo cual significa que los huevos probablemente sean anteriores a la explosión de biodiversidad que se produjo en el Cámbrico, hace 530 millones de años. Los peces y los anfibios ponen huevos gelatinosos. Los antepasados de los reptiles y aves pusieron el primer huevo con cáscara hace 340 millones de años. Esa innovación, que permitió que los huevos sobreviviesen y continuaran su desarrollo en tierra, dio lugar a la aparición de vertebrados terrestres, mucho antes de que cantase el primer gallo.

—*Michael Moyer*



LUZ

No un súbito fogonazo, sino un lento y progresivo amanecer

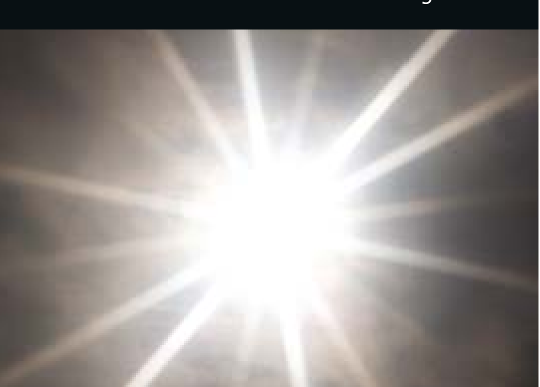
Las cualidades de la luz que nos son familiares (onda electromagnética, riada de fotones, fuente de información acerca del mundo) fueron emergiendo en sucesivos estadios a lo largo de los primeros milenios de la historia cósmica.

En los primerísimos momentos, el electromagnetismo no operaba como una fuerza independiente, sino que se hallaba entretejido con la fuerza nuclear débil, que gobierna la desintegración radiactiva. Aquella fuerza electrodébil producía un fenómeno reconocible como luz, pero más complicado. Por ejemplo: no había una, sino dos formas de luz primigenia, formadas por los bosones *B* y *W*. Transcurridos unos 10^{-11} segundos, el universo se había enfriado lo suficiente para que el electromagnetismo pudiera zafarse de la fuerza débil; los bosones se reconfiguraron por sí solos de modo que brotaron los fotones.

Los fotones se hallaban totalmente mezclados con partículas materiales como los quarks. Formaban con éstos una sopa indiferenciada. Habríamos visto entonces un resplandor cegador, sin ningún rasgo distintivo, rodeándonos por todas partes, que, al carecer de variaciones de brillo o de color, informaría tan poco como la oscuridad perfecta. Los primeros objetos dotados de alguna estructura interna no afloraron hasta los 10 microsegundos, cuando los quarks se aglomeraron en protones y neutrones; éstos, hacia los 10 milisegundos, formaron núcleos atómicos. Sólo entonces empezó la materia a dejar una impronta en la luz.

Transcurridos unos 380.000 años, la sopa se descompuso y la luz empezó a fluir a través del espacio en líneas más o menos rectas. Pudo por fin iluminar objetos y formar imágenes. Cuando esa luz primordial fue atenuándose y se hizo más roja, el universo atravesó un período sombrío, la Edad Oscura. Finalmente, llegado a una edad de alrededor de 300 millones de años, se encendieron las primeras estrellas y el universo adquirió la capacidad de engendrar nueva luz. En el libro del Génesis la luz apareció antes que la materia; en la física, ambas surgieron a la vez.

—George Musser



LA PILDORA

Los tratamientos de infertilidad han llevado a la "liberación reproductora"



El anticonceptivo oral se ha difundido hasta tal punto en todo el mundo que acabó llamándosele simplemente "la píldora". Durante decenios había sido el sueño de Margaret Sanger, preconizadora de la planificación familiar, aunque ninguno de los hombres que convirtieron en realidad su deseo emprendió sus trabajos con ese propósito. En los años treinta del siglo XX empezó a conocerse la función de las hormonas esteroides en el cuerpo y a pensar en su potencial terapéutico, pero la extracción de hormonas de animales resultaba prohibitivamente cara para la mayoría de las aplicaciones médicas. En 1930, el químico estadounidense Russell Marker ideó un método para fabricar esteroides a partir de plantas, método que todavía hoy sigue siendo la base de la producción de hormonas. La empresa que fundó, Syntex, desarrolló pronto una progesterona sintética inyectable derivada de un ñame silvestre.

La progesterona era un fármaco que parecía interesante para el tratamiento de las irregularidades menstruales que contribuían a la infertilidad: su función natural es impedir la ovulación durante el embarazo y en partes del ciclo menstrual de la mujer. En 1951, Carl Djerassi, químico de Syntex y más tarde también escritor, sintetizó una progestina de origen vegetal que podía administrarse de forma práctica por vía oral.

En 1953, cuando Sanger y su adinerada benefactora Katharine Dexter McCormick hablaron con el experto en esteroides Gregory Pincus sobre la creación de una píldora anticonceptiva, éste estaba trabajando para una organización pequeña y en apuros de Massachusetts, la Fundación Worcester de Biología Experimental. Pero veinte años antes, en la Universidad de Harvard, había provocado cierto escándalo al realizar la fecundación *in vitro* de conejos; Sanger pensó que Pincus poseía la audacia y el conocimiento necesarios para producir su largamente buscada píldora.

Pincus a su vez contrató a un médico especialista en fertilidad, John Rock, que ya utilizaba la progesterona para suspender durante unos meses la ovulación de sus pacientes con la esperanza de estimular su fecundidad. Todavía con el pretexto de investigar sobre la fertilidad, Rock y Pincus emprendieron en 1954 el primer ensayo en humanos: inyectaron progestinas sintéticas a 50 mujeres durante tres meses. Todas interrumpieron la ovulación mientras duró el ensayo y la reanudaron cuando se retiraron los fármacos. Tras varios años de experimentación, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. aprobaba en junio de 1960 la primera píldora anticonceptiva.

—Christine Soares

ELLINOR HALL *Getty Images* (*Sol*); CORBIS (*píldoras*)

DIENTES

Son muy anteriores a la sonrisa

Los primeros dientes, ¿se encontraban en el interior o en el exterior de los animales? Los tiburones están cubiertos por miles de pequeños dentículos, unas protuberancias de dentina y colágeno parecidas a los dientes. Se conjeturaba que los dentículos de algunos vertebrados muy primitivos pudieron ser, si hubiesen emigrado hasta la mandíbula y allí hubiesen crecido y adquirido nuevas funciones, el origen de los dientes actuales. Sin embargo, una serie de pruebas fósiles y genéticas han confirmado en los últimos años que los dientes son mucho más antiguos que los tiburones, más incluso, que la mandíbula y que los dentículos. Y tuvieron su origen dentro del cuerpo, aunque no en la boca.

Las primeras dentaduras fueron las de los conodontos, unas criaturas de entre cuatro y cuarenta centímetros de largo, semejantes a las anguilas, que vivieron hace unos 525 millones de años; deben su nombre al anillo de largos dientes cónicos de su faringe. Algunas especies de peces tienen aún dientes vestigiales en la garganta, pero se cree que la mayoría de los dientes faríngeos se trasladaron a la boca, quizás a medida que se desarrolló evolutivamente la mandíbula.

Uno de los indicios en favor de esa idea consiste en que la actividad genética programada que hace que se formen los dientes es distinta de las instrucciones que llevan a la formación de la mandíbula, aunque ambas estructuras crecen de forma coordinada. La unión de dientes y mandíbulas, sin embargo, fue probablemente lo que dio lugar a formas de dientes especializadas. Al llegar el décimo día del desarrollo de un embrión humano se están produciendo ya las señales moleculares que inician la formación de los dientes entre dos capas de tejido embrionario. Al mismo tiempo, las señales de la mandíbula en proceso de crecimiento imprimen una forma al diente primordial que ya no podrá cambiar. Incluso cuando el brote inicial de un futuro molar se trasplanta a una zona distinta de la mandíbula, el diente final se convertirá en aquello a lo que está destinado por su situación original.

Por desgracia, cuesta recapitular en el laboratorio unos quinientos millones de años de evolución. Como los dientes nacientes dependen de la información de la mandíbula embrionaria en crecimiento, el trabajo dirigido a generar nuevos dientes a partir de células madre dentales se centra en su formación en el lugar deseado dentro de la boca; pero aún no está claro que la mandíbula adulta pueda proporcionar las señales necesarias.

—Christine Soares

LA PLACENTA

Procede evolutivamente de una membrana de la cáscara del huevo

Hace más de 120 millones de años, mientras los dinosaurios gigantes se enzarzaban en las selvas, ocurría en el sotobosque del Cretácico un espectáculo más tranquilo: cierto linaje de seres diminutos y peludos dejó de poner huevos y parió crías vivas. Se trataba de los ascendientes de casi todos los mamíferos actuales (a excepción de ornitorrincos y equidnas, que hoy en día todavía ponen huevos).



GETTY IMAGES

Lo que hace posible el nacimiento con vida de los mamíferos es un órgano singular, la placenta, que envuelve al embrión en desarrollo y regula el flujo de nutrientes y gases entre el feto y la madre a través del cordón umbilical.

La placenta parece haber evolucionado a partir del corion, una membrana delgada que reviste el interior de la cáscara de los huevos y sirve a los embriones de reptiles y aves para obtener oxígeno. Los canguros y otros marsupiales poseen y necesitan sólo una placenta rudimentaria: tras una corta gestación, sus crías, del tamaño de una alubia, finalizan su desarrollo mientras maman en la bolsa de la madre. Sin embargo, los humanos y la mayoría de los mamíferos requieren una placenta que extraiga los nutrientes de la sangre de la madre durante una prolongada gestación.

Estudios recientes han demostrado que la complejidad de la placenta se debe, en parte, a la manera en que diferentes genes de la misma se activan a lo largo del tiempo. Al principio del desarrollo embrionario, las placentas de los ratones y de los humanos dependen del mismo conjunto de genes antiguos relacionados con la proliferación celular. Pero hacia el final de la gestación, aunque la placenta no altere aparentemente su aspecto, recurre a genes más modernos y exclusivos de la especie. De ese modo, las placentas están adaptadas a las necesidades de mamíferos con diferentes estrategias reproductoras: basta comparar a los ratones, cuya gestación dura tres semanas y paren 12 o más crías, y a los humanos, que a los nueve meses dan a luz sólo una.

Para que la placenta, que, antes que otra cosa, es un órgano del feto, perdure más de una o dos semanas, debe evitar que el sistema inmunitario de la madre la rechace. Para ello, despliega un ejército mercenario de retrovirus endógenos, genes víricos insertados en el ADN de los mamíferos. Se ha observado a dichos virus emergiendo de las membranas celulares de la placenta. Es posible que desempeñen la función crucial de apaciguar el sistema inmunitario de la madre para que acepte la placenta (así es como ayudan a algunos tumores a sobrevivir).

—Davide Castelvecchi

Nanotecnia medieval

El reflejo dorado, técnica decorativa que se aplica a la cerámica desde la Edad Media, se basa en la formación de materiales nanoestructurados

El reflejo dorado apareció en la decoración de vasijas cerámicas alrededor del siglo IX en el Irak de la dinastía abásida. Se extendió luego hasta Egipto, desde donde, tras la caída del imperio fatimí en 1179, los ceramistas emigraron a Siria e Irán, por una parte, y a los reinos taifas de la península Ibérica, por otra. Durante los siglos XIII y XIV, esta técnica se extendió por el reino de Aragón, para llegar posteriormente a Italia en el siglo XV.

El reflejo dorado se obtiene mediante la aplicación, a pincel o pluma, de una mezcla de fases de cobre y plata, arcilla rica en hierro y un compuesto de azufre (antiguamente cinabrio, SHg, hoy en día yeso) sobre el vidriado cerámico previamente cocido, para posteriormente cocerlo de nuevo en pequeños hornos a unos 550 ºC. Una vez cocido y retirado el exceso de materia que no ha reaccionado, aparece una capa de aspecto metálico rojizo o amarillo.

El estudio, mediante microscopía electrónica de transmisión, de esta decoración ha mostrado que se trata de una capa fina (de entre 200 y 500 nanómetros) formada por una matriz vítrea con cristales redondeados de cobre y plata (en algunos casos, además, óxidos de cobre) de entre 5 y 50 nanómetros. Se trata, pues, de una capa delgada nanoestructurada, como las que la técnica moderna se afana por conseguir en condiciones específicas para las industrias electrónica y óptica. El interés de la decoración de reflejo metálico es que viene produciéndose desde la Edad Media en talleres cerámicos, muy alejados de los laboratorios actuales.

El conocimiento empírico de los procesos por parte de los ceramistas medievales recala en la alquimia y en numerosos ensayos de prueba y error hasta alcanzar el producto deseado. El ceramista ignoraba que el reflejo metálico tenía lugar mediante un intercambio de iones alcalinos del vidriado cerámico (sodio, potasio o ambos) con el cobre y la plata de la mezcla aplicada, que durante el proceso de cocción alcanzaban los estados de sulfuro de cobre (Cu_2S) y sulfuro de plata (Ag_2S), para mantener el equilibrio electrónico. A pesar de ignorarlo, en los talleres valencianos de Paterna y Manises los vidriados destinados a la decoración de reflejo eran más ricos en potasio (un 4 por ciento frente al 1,5 o 2 por ciento del resto del mismo taller).



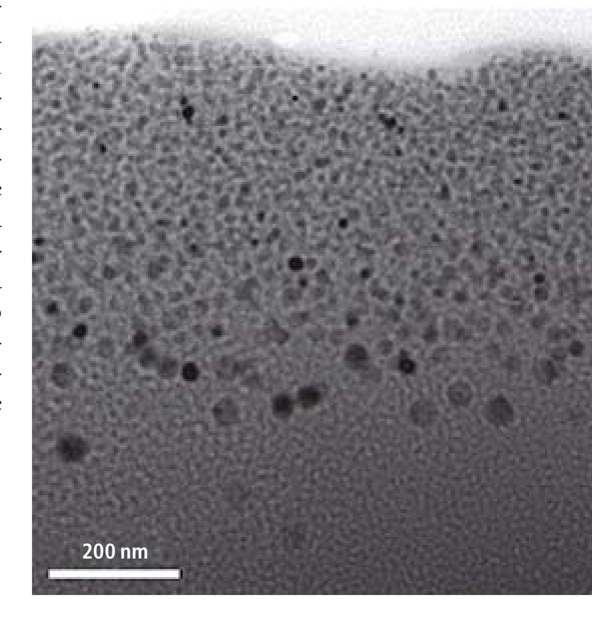
1. Vaso de cerámica del s. X decorado mediante la técnica del reflejo dorado (Susa, Irán).

MARIE-LAN NGUYEN/WIKIMEDIA COMMONS

El mismo ceramista que al usar sulfuro de mercurio en la mezcla posiblemente aceleraba su propia muerte y la de su familia (los hornos de reflejo se hallaban en el patio trasero de la casa para mantener el secreto de la fórmula), debía saber que, si no lo añadía, el reflejo no aparecía. Ahora conocemos que la plata se reduce rápidamente a su forma metálica (Ag^0) antes de entrar en el vidriado, mientras que el cobre permanece en forma iónica (Cu^{2+}) y, en estas condiciones, no se intercambia con los elementos alcalinos; el azufre facilita la formación de sulfuros de plata y de cobre, a la vez que colabora en la reducción de Cu^{2+} a Cu^+. Además, los elementos alcalinos incorporados a la mezcla actúan de fundente para formar una fase fundida que facilita el intercambio catiónico.

Cristales de cobre y plata

Los instrumentos medievales no permitían observar que el desarrollo de los cristales de cobre y plata metálicos te-



2. Sección transversal de una capa de reflejo metálico, obtenida por microscopía electrónica de transmisión. Se observan cristales nanométricos, casi esféricos, de cobre y plata.

nía lugar en el interior de la matriz de vidrio, inmediatamente bajo su superficie, y que, al crecer, la deformaban. Por consiguiente, la capa de reflejo metálico no es otra cosa que la parte externa del vidriado (pongamos los primeros 500 nanómetros), cuya composición se ha modificado durante la cocción: por un lado, ha perdido parte del fundente de plomo (por volatilización a causa de la agitación térmica), así como potasio y algo de sodio (por el intercambio iónico); por otro lado, se ha enriquecido en cobre y plata, que tienden a la formación de cristales nanométricos de Cu^o y Ag^o. Son estos cristales los que reflejan la luz como metales, produciendo el reflejo metálico deseado. Si las condiciones no son las adecuadas, el cobre permanece como óxido, en forma de nanocristales o disuelto en la matriz de vidrio; entonces, el reflejo no tiene lugar, al menos metálico.

Por supuesto, el ceramista medieval no siempre alcanzaba el éxito en forma de reflejo metálico. Cuando las piezas resultaban con una decoración marrón, sin reflejo alguno, las vendía en el mercado local, quizá como gangas; por algo las había trabajado y dado tres cocciones. Las que alcanzaban el reflejo lucían colores rojizos o amarillos, sin que el artesano lograra un control total sobre este aspecto (no se alcanza hasta las producciones de Gubbio y Deruta en el siglo XV). Nuestro ceramista valenciano se conformaba con obtener el reflejo dorado, aunque éste fuera heterogéneo por la mayor capacidad de la plata de reducirse a metal y formar manchas azuladas, o por el distinto color de la zona de menisco en el momento de aplicar la mezcla. A fin de cuentas, se tardaría más de 600 años en saber que el color depende del tamaño de los cristalitos de cobre y plata que se forman y de la distancia que exista entre ellos.

Marius Vendrell
Departamento de cristalografía y mineralogía
Universidad de Barcelona

Nubosidad e irradiancia eritemática

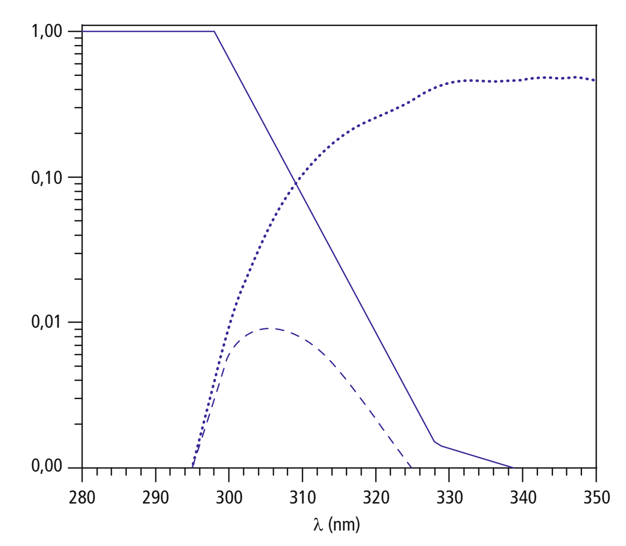
El grado en que la radiación ultravioleta solar quema la piel depende de la nubosidad total más que de la nubosidad en capas bajas

La radiación ultravioleta (UV) abarca las longitudes de onda del espectro electromagnético comprendidas entre 100 y 400 nanómetros (nm). Se divide en tres bandas según los efectos biológicos que origina: UVC (100-280 nm), UVB (280-315 nm) y UVA (315-400 nm).

La exposición intensa y momentánea a la radiación UV produce acaloramiento, eritema (quemadura solar) y otras molestias entre 12 y 24 horas después de la exposición a la luz. El exceso de exposición crónica a la radiación UV produce fotoenvejecimiento de la piel y una predisposición al desarrollo de condiciones cutáneas precancerígenas.

Los efectos eritemáticos de la radiación solar se expresan mediante el concepto de radiación ultravioleta eritemática, o eritemáticamente activa (UVER), que tiene en cuenta tanto la curva espectral de la radiación solar incidente en el suelo como la respuesta de la piel humana a la radiación UV incidente sobre la misma, respuesta que se refleja en la llamada "curva del espectro de acción" del eritema.

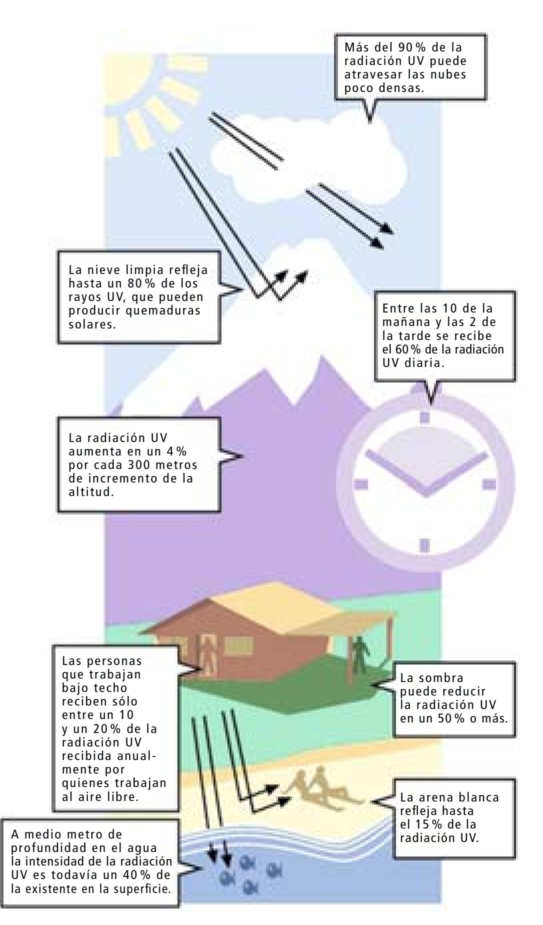
La UVER se determina multiplicando las dos curvas espectrales indicadas. La curva del espectro de acción del eritema presenta un máximo absoluto en 297 nm. En 1987 la CIE (Commission Internationale de l'Eclairage, Comisión Internacional de la Iluminación) adoptó una "Curva Estándar de Eritema", que es la utilizada en la actualidad para determinar la radiación UVER (*véase la figura 1*).



1. Irradiancia UVER (*curva discontinua*), resultado de la multiplicación de la intensidad relativa de la irradiancia solar ultravioleta en el suelo según la longitud de onda (*curva de puntos*) y la curva del espectro de acción del eritema humano, la intensidad relativa del efecto eritémico de la luz solar en la piel (*curva continua*). La escala es logarítmica: a 300 nm la acción eritémica es unas 10 veces mayor que a 310 nm y unas 100 veces mayor a 320 nm.

La radiación UV que incide en el suelo es el resultado de una serie de factores combinados que actúan a su paso a través de la atmósfera. La atmósfera terrestre, en general, atenúa y modifica la radiación mediante procesos de dispersión y absorción. El conjunto de procesos implicados comporta que la radiación solar en el suelo sea considerablemente inferior a la que incide en el límite superior de la atmósfera: la radiación UV incidente en el suelo es 20-30 veces menor que la que incide en el límite superior de la atmósfera. En el rango de la radiación UV, los principales factores que afectan a los valores incidentes en el suelo son: la altura solar, la latitud, la altitud del terreno sobre el nivel del mar, la reflectividad del suelo (el albedo), la dispersión atmosférica (por moléculas de aire y aerosoles), la absorción atmosférica (por las moléculas de ozono estratosférico) y la nubosidad (*véase la figura 2*).

En particular, el efecto de la nubosidad sobre la radiación UV es muy complejo. Se ha de recurrir a parámetros que hacen



2. Factores atenuantes de la radiación UV.

referencia a la cantidad total de nubes presentes; por ejemplo, la cobertura nubosa, su espesor óptico, el tipo de nubosidad, etc. El parámetro más comúnmente empleado es la cobertura nubosa, que se determina a partir de la fracción de cielo cubierta de nubes. Se mide en octas, de forma que el valor de 0 corresponde a cielos totalmente despejados y el valor de 8 a cielos totalmente cubiertos. Se consideran cielos parcialmente nubosos los que tienen entre 3 y 4 octas, y nubosos los que tienen entre 5 y 6 octas.

La medición de la cobertura nubosa la realiza visualmente un observador meteorológico de manera discontinua, a razón de tres observaciones al día. Por esta razón, y debido a la gran variabilidad espacial y temporal que presentan las nubes, es difícil establecer de forma cuantitativa su influencia sobre la radiación UV.

No obstante, en una primera aproximación se puede utilizar este parámetro para estudiar la influencia de la nubosidad sobre los valores de radiación UVER. Se han realizado estudios empleando valores de nubosidad correspondientes a las 13:00 horas, registrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Este tipo de análisis se realiza en función del ángulo cenital (es decir, el ángulo complementario a la altura solar), y distinguiendo entre la nubosidad total (considerando conjuntamente nubes altas, medias y bajas) y la nubosidad en capas bajas.

Para acometer esa tarea, se calcula, para cada ángulo cenital, el valor medio de la UVER, que se representa frente al correspondiente valor de nubosidad. Los valores de la UVER se clasifican según las distintas categorías de cobertura de cielo: claro (0-2 octas), parcialmente nuboso (3-5 octas) y nuboso (6-7 octas). Se observa, tanto para nubosidad total como para nubosidad en capas bajas, que la UVER disminuye al aumentar la nubosidad. Además, a medida que el ángulo cenital aumenta, es decir, para alturas solares más bajas, se potencia la disminución de la UVER. Se intensifica asimismo la disminución de la UVER cuando se considera la nubosidad total y no la nubosidad en capas bajas.

Estos estudios se pueden completar introduciendo el factor de modificación por nubes (CMF), que se define como el cociente entre la irradiancia UVER recibida y la simulada con un modelo de transferencia radiativa que proporciona la radiación en el suelo, en el caso de cielos sin nubosidad. El factor de modificación, un índice de transmisividad de nubes, se utiliza para eliminar el efecto sobre la UVER del ozono o del ángulo cenital. La variación del CMF se ha analizado en nubosidad total y en nubosidad en capas bajas.

Tanto para nubosidad total como para nubosidad en capas bajas se encuentra una transmisividad para cielos totalmente cubiertos del 40 %. Esta alta transmisividad contrasta con el 20 % obtenido para la luz visible, lo que indica que la nubosidad, pese a constituir un factor de atenuación muy importante en la irradiancia eritemática, tiene menor influencia en este rango espectral que en el de la radiación visible.

J. A. Martínez Lozano, A. R. Esteve y **M. P. Utrillas**
Dpto. de Física de la Tierra y Termodinámica, Universidad de Valencia

M. J. Marín
Unidad Mixta CEAM-UVEG. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM), Valencia

Propagación de la gripe A

Claves de una nueva pandemia

El virus de la gripe de tipo A H1N1, derivado de la recombinación genética de virus de gripe porcinos, aviares y humanos, es el causante de la primera pandemia de gripe del siglo XXI. Las claves del éxito pandémico de un virus radican en su rapidez y eficiencia de transmisión. Veamos algunas de las características del virus de la gripe, de su transmisión y las medidas que pueden ayudar a frenar la propagación del mismo.

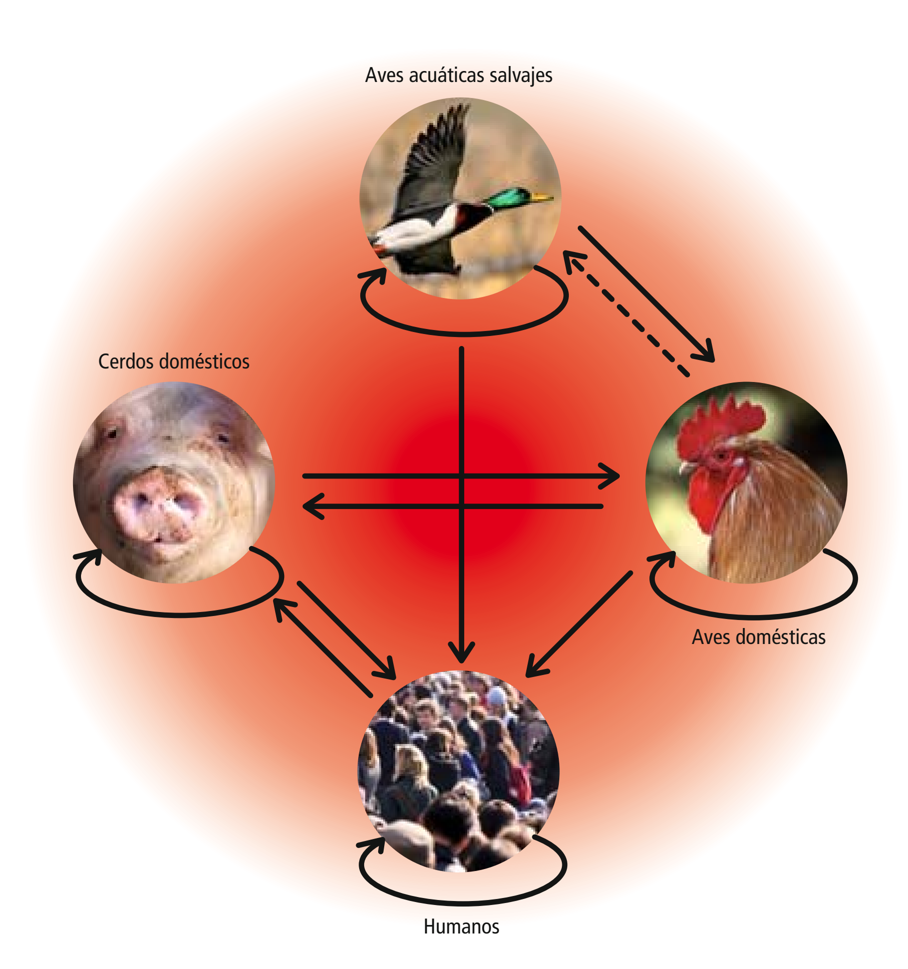
El virus

La gripe es una enfermedad respiratoria causada por la infección por el virus del mismo nombre. Hay tres tipos de virus de la gripe: A, B y C. Los de tipo A y B son los que causan un mayor número de complicaciones infecciosas en humanos. Los virus de la gripe de tipo A se clasifican, a su vez, en subtipos, entre ellos H1N1 y H3N2, que provocan la gripe estacional en humanos, año tras año. La vacuna anual contra la gripe en humanos está compuesta por un cóctel de virus de la gripe, inactivados, H1N1, H3N2 y B.

La unidad elemental del virus es el virión o partícula infecciosa. Un virión de gripe consta de ácidos nucleicos (portadores de la información genética del virus), proteínas (responsables de la infección, replicación y transmisión) y lípidos (capturados de la célula infectada

FUENTE: ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD

Transmisión del virus de la gripe entre especies animales: el virus de la gripe A infecta, se replica y se transmite entre aves acuáticas, aves de corral, cerdos y humanos. Además de las especies representadas en la figura, el virus infecta a caballos, perros, gatos, mamíferos marinos y mustélidos.



para forjar la membrana que recubre al virión). Ancladas en la membrana viral se encuentran las proteínas hemaglutinina (H), neuraminidasa (N) y M2, cuya función es la de posibilitar la entrada del virus en la célula infectada y su posterior salida.

Los subtipos de virus de gripe A se denominan en función del subtipo de hemaglutinina (hay 16 subtipos) y neuraminidasa (hay 9 subtipos) del virión. La hemaglutinina y la neuraminidasa de la gripe A pandémica (H1N1) pertenecen al subtipo 1. En el interior del virión se encuentra el material genético del virus, compuesto por ocho segmentos de ARN y las proteínas M1 y NEP, además de NP, PB1, PB2 y PA, requeridas para la replicación del ARN vírico.

Aparte de esas proteínas estructurales, el virus sintetiza otras dos proteínas, PB1-F2 y NS1, que se expresan sólo en la célula infectada. NS1 se encarga de enmascarar la infección para que la célula no reconozca el virus y así demorar la respuesta antivírica del huésped.

Evolución y propagación

El virus de la gripe de tipo A puede infectar numerosas especies animales. Las aves acuáticas, en concreto ciertas especies de patos salvajes, son huéspedes naturales del virus; los síntomas son en éstas más atenuados que en aves de corral, como gallinas y patos domésticos. La amplia variedad de subtipos de virus de la gripe en aves acuáticas las convierte en un excelente caldo de cultivo: los virus intercambian segmentos de ARN cuando coinfectan el mismo huésped, facilitando la generación de nuevas cepas.

Alguno de esos nuevos virus tienen la capacidad de saltar de una especie a otra e infectar aves domésticas u otros animales de granja, entre ellos cerdos y caballos. Eventualmente, esas cepas pueden replicarse y transmitirse. Ciertas adaptaciones del virus hacen que éste pueda transmitirse en humanos. La secuencia genética del virus causante de la nueva pandemia de gripe A indica que su historia evolutiva pudo haber seguido este camino de adaptación entre especies.

El virus de la gripe se transmite en humanos por vía respiratoria. La transmisión puede ocurrir mediante el contacto físico directo con una persona infectada o mediante el contacto indirecto, a través de un objeto que ésta haya tocado previamente o a través de las partículas infecciosas diseminadas en el aire por tos o estornudos. El contacto de partículas víricas con los ojos, la boca o la mucosa nasal constituye el desencadenante de la infección.

¿De qué depende la propagación?

Las variables que determinan si un virus va a causar una epidemia son la velocidad y la eficiencia con que éste se transmite de una persona infectada a otra no infectada. La velocidad de trasmisión del virus se mide a partir del "tiempo de generación" (Tg): tiempo que trascurre entre la infección de una persona y la infección de la persona a la que ésta infecta. En el caso de la gripe, el tiempo de generación está en torno a tres días; es uno de los factores que posibilitan la rápida propagación de un foco infeccioso.

La eficiencia o número de personas infectadas a partir de un primer caso se cuantifica mediante la "velocidad de reproducción" (R). Si R es mayor que 1, un infectado puede infectar a más de una persona; marca, por tanto, el comienzo de un núcleo epidémico. Por el contrario, si R es menor que 1, el virus sucumbirá en su transmisión y el foco epidémico desaparecerá. Virus altamente contagiosos como el virus de la poliomielitis presentan valores de R en torno a 10 (una persona infectada puede infectar a otras 10). En la gripe, R varía entre 1,4 y 2,6.

Entre los factores que disminuyen la eficiencia de trasmisión del virus de la gripe destacan: la preexistencia de defensa inmunitaria contra el virus por una infección previa, las medidas profilácticas (vacunación y uso de antivirales) y las medidas de contención (control de contacto con personas infectadas y uso de precauciones higiénicas que dificulten la diseminación de partículas infecciosas, como el lavado de manos y el uso de máscaras).

Pero el virus de la gripe no permanece impasible; utiliza su potencial evolutivo para eludir los mecanismos que

previenen su replicación y transmisión. Debido a la elevada frecuencia de introducción de mutaciones por la polimerasa del virus durante su replicación, el genoma vírico es altamente variable; las proteínas víricas presentan, en consecuencia, un número elevado de mutaciones que el virus utiliza como herramienta para adaptarse a su nicho infectivo.

Algunas de tales mutaciones logran evadir la respuesta inmunitaria del organismo o alteran la eficacia de vacunas y medicamentos antivirales, con lo que incrementan R y la transmisibilidad.

Medidas de contención

Hasta la fecha, a pesar de la alarma causada por la nueva pandemia del virus de la gripe H1N1, no existen pruebas de que esta cepa provoque una incidencia mayor de enfermedad severa en humanos que la gripe estacional. Sin embargo, existe la posibilidad de que esta cepa produzca un mayor número de infecciones en humanos que en años anteriores, debido a la ausencia de inmunidad previa generada por infecciones pasadas; puede, por tanto, que R crezca por encima de los valores habituales. En ausencia de medidas de contención, ello daría lugar a un número de hospitalizaciones y muertes mayor que antaño.

Para minimizar el contagio del virus, las autoridades sanitarias recomiendan cubrirse la nariz y la boca con un pañuelo al toser o estornudar, tirar el pañuelo usado a la basura, lavarse las manos con frecuencia con agua y jabón, evitar tocarse los ojos, la nariz y la boca y no asistir a lugares concurridos si se está enfermo.

Esas medidas, aunque pueden ayudar a frenar la transmisión del virus, no son del todo efectivas. Deben acompañarse de un tratamiento profiláctico mediante vacunación o el uso de medicamentos antivirales, lo cual, amén de disminuir los síntomas severos de infección, constituye la forma más eficaz para disminuir el valor de R y, por tanto, la transmisión del virus. Por todo ello, reviste especial interés la producción y distribución de una vacuna basada en la nueva cepa H1N1 pandémica, junto con la vacuna contra las cepas anteriores H1N1, H3N2 y B.

Estanislao Nistal Villán
y **Adolfo García Sastre**
Departamentos de microbiología y medicina, e Instituto de Salud Global y Enfermedades Emergentes, Facultad de medicina del Monte Sinaí, Nueva York

Detección del tránsito de HD 80606b

La presencia de tránsitos del planeta HD 80606b permitirá obtener información precisa de objeto celeste tan exótico

Una de las ramas de la astronomía más activas es la dedicada al estudio y detección de planetas extrasolares. Desde el descubrimiento en 1995 del primero, en torno a una estrella de tipo solar, ya se han encontrado más de 350 planetas en órbita alrededor de otras estrellas. El número sigue creciendo.

La detección de un exoplaneta debe realizarse con métodos indirectos. Excepto en casos excepcionales como el reciente del planeta observado cerca de la estrella Fomalhaut por el Telescopio Espacial Hubble, resulta imposible la detección directa de un exoplaneta. Un planeta es un cuerpo mucho más pequeño que la estrella alrededor de la cual orbita. La luz que refleja procedente de dicha estrella es insignificante; la visión del planeta queda completamente ofuscada para nuestros instrumentos a no ser, como en el caso de Fomalhaut, que se halle suficientemente alejado de la estrella.



Comparación a escala de la órbita de HD80606b con las órbitas de Mercurio, Venus y la Tierra. En el centro se ha colocado a la estrella HD 80606b.

El método que más éxito está teniendo en la detección de planetas extrasolares se basa en el efecto Doppler. Una estrella que tenga planetas orbitando a su alrededor verá su movimiento en el espacio afectado por la influencia gravitatoria del planeta (o planetas). Dichas alteraciones del movimiento se traducen en variaciones de velocidad de la estrella; el estudio del efecto Doppler permite descubrirlas. Si, además, el plano de la órbita planetaria se encuentra muy cercano a la visual del observador terrestre, el exoplaneta pasará en cada revolución por delante de la estrella y, por tanto, se producirá un pequeño eclipse, o tránsito.

La fracción de luz de la estrella que el planeta intercepta es muy pequeña, pero si el planeta es suficientemente grande, un telescopio podrá detectar el eclipse fotométricamente. No todos los exoplanetas detectados por efecto Doppler producen tránsitos. Mas, cuando resulta posible combinar ambas técnicas de observación, se obtiene información física fundamental sobre el planeta: la masa en kilogramos, el tamaño en kilómetros, sus parámetros orbitales completos, etc. Con técnicas de observación refinadas, podemos incluso analizar su atmósfera.

El caso de HD 80606b se convertirá en paradigmático. Se trata de uno de los planetas extrasolares más exóticos entre todos los conocidos hasta ahora. Fue descubierto por el equipo dirigido por Dominique Naef, del Observatorio de Ginebra, en 2001, con la técnica del efecto Doppler. HD 80606, la estrella a cuyo alrededor orbita el planeta HD 80606b, es muy parecida al Sol y forma a su vez un sistema estelar binario con la estrella HD 80607. Se cree que ambas estrellas se encuentran separadas entre 1200 y 1500 veces la distancia que media entre la Tierra y el Sol.

HD 80606b es un planeta gigante, con un tamaño muy parecido al de Júpiter, aunque con una masa unas cuatro veces superior y un período orbital de 111 días. Una de las características más especiales de HD 80606b reside en la alta excentricidad de su órbita, la más alta de un planeta extrasolar conocido. La órbita dibuja una elipse tan alargada, que durante el paso por el periastro HD 80606b se acerca a menos de 5 millones de kilómetros de HD 80606, pero en el apoastro, el punto de máxima separación entre la estrella y el planeta, la distancia supera los 130 millones de kilómetros. Estas enormes variaciones de distancia implican que la cantidad de energía que recibe HD 80606b de su estrella materna es unas 800 veces superior en el periastro que en el apoastro.

La atmósfera de HD 80606b se calienta tanto durante los pasos por el periastro que sus variaciones de temperatura son detectables desde el espacio con telescopios que trabajen en la banda del infrarrojo térmico. Mediante observaciones en el infrarrojo con el Observatorio Espacial Spitzer, Greg Laughlin, de la Universidad de California en Santa Cruz, descubrió que HD 80606b era *ocultado* por HD 80606 cerca de su paso por el periastro. Esta observación aumentó las posibilidades de que el planeta transitase por delante de la estrella, lo que podía abrir una ventana de vital importancia para acceder a un conocimiento más detallado de ese mundo. Los tránsitos debían producirse cada 111 días, y el siguiente más favorable estaba previsto para el 13-14 de febrero de 2009.

Y efectivamente, tres equipos internacionales observaron el tránsito en la noche del 13 al 14 de febrero de 2009: el dirigido por Stephen J. Fossey, del Colegio Universitario de Londres, el de Claire Moutou, desde el Observatorio de la Alta Provenza y donde se recabaron también datos de la velocidad radial, y el nuestro, formado por Peter McCullough, del Instituto del Telescopio Espacial Hubble, y el autor, con el telescopio de 0,61 m del Observatorio Esteve Duran, en Seva (provincia de Barcelona). Sólo se pudo observar el tránsito parcialmente, debido a su larga duración, que se estima en unas 12 horas. No pudo verse desde el continente americano pese a que varios observatorios de Estados Unidos lo intentaron. No se tienen noticias de observaciones que captasen el principio del fenómeno.

Aunque el tránsito sólo fue visto parcialmente, lo que todavía arroja algo de incertidumbre sobre algunos de los parámetros físicos de HD 80606b, las observaciones fotométricas y espectroscópicas han permitido averiguar que la órbita del planeta se encuentra muy inclinada respecto del ecuador de HD 80606, lo que añade otra peculiaridad a sus características orbitales. HD 80606b se ha convertido en el planeta con tránsitos de período más largo conocido.

Se espera que futuras observaciones durante más ocultaciones en infrarrojo, tránsitos y medida de velocidades radiales permitan investigar el origen de la peculiar órbita de HD 80606b, su relación con el sistema estelar binario, la composición química de la atmósfera del planeta, o cómo influye en la circulación global de la misma las variaciones de irradiación que sufre HD 80606b a lo largo de los 111 días de su ciclo orbital, sólo por mencionar algunos de los nuevos campos que se abren con el estudio de este mundo tan particular.

Enrique García Melendo
Observatorio Esteve Duran, Seva

Mecánica de la migración celular

¿Qué fuerzas gobiernan el movimiento celular durante la morfogénesis, la metástasis y la regeneración de los tejidos?

La mayoría de las células que forman los organismos tienen la capacidad de migrar en respuesta a estímulos externos o a programas genéticos internos. Cuando está correctamente regulada, la migración celular constituye una pieza clave en algunas de las funciones biológicas más asombrosas que existen en la naturaleza como son la defensa inmunitaria, el desarrollo embrionario o la regeneración de tejidos por células madre.

Por el contrario, cuando la regulación falla, la migración celular propicia algunas de las enfermedades más devastadoras de nuestros tiempos como la inflamación crónica o el cáncer. En el caso de esta última patología, la causa principal de muerte es la metástasis, es decir, el proceso por el cual células cancerígenas abandonan un tumor primario y migran hacia otros órganos para formar tumores secundarios. Si consiguiéramos controlar dicha migración, la mortalidad asociada al cáncer se vería drásticamente reducida. Este es sólo un ejemplo de una larga lista de enfermedades que podrían prevenirse o tratarse si comprendiéramos los mecanismos básicos que subyacen bajo la migración celular.

Individual y colectiva

Existen dos tipos fundamentales de migración celular: la individual y la colec-

MIGRACION INDIVIDUAL

La migración celular individual resulta de la combinación de ciclos de extensión-contracción y de adhesión-desenganche. Durante todo el proceso, las fuerzas de tracción en el polo anterior y posterior (*flechas negras*) están equilibradas según las leyes Newton.

Cuando una célula estática recibe un estímulo migratorio, extiende en la dirección del movimiento un lamelopodio rico en actina (*1*). Este se adhiere luego a la superficie de migración (*2*). A continuación, la célula deshace su adhesión posterior (*3*). Por fin, mediante la contracción del citoesqueleto, mueve su contenido hacia el polo anterior (*4*).

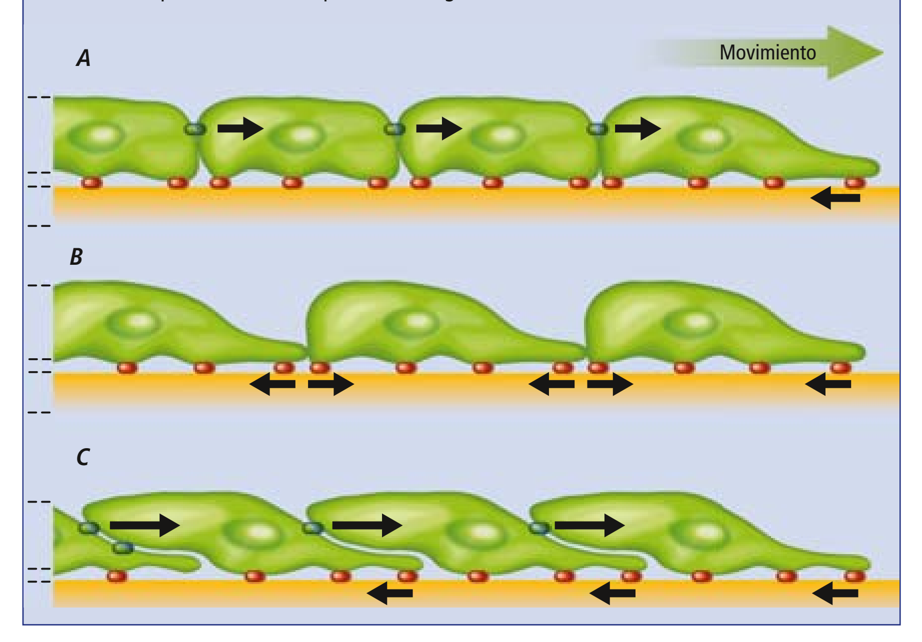
MIGRACION COLECTIVA

Varios modelos describen la migración celular colectiva.

Modelo A: Una célula líder encabeza el grupo y ejerce una fuerza sobre el substrato (*flechas negras*) a través de sus adhesiones focales (*rojo*). Esta fuerza se transmite, mediante uniones adherentes (*azul*), a las células siguientes ("followers"), que desempeñan una función pasiva, como los vagones de un tren encabezado por una locomotora.

Modelo B: Cada célula del grupo genera fuerzas de tracción y se autopropulsa, como los vehículos que se desplazan cohesivamente en un atasco.

Modelo C: Cada célula ejerce tracción sobre el substrato y transmite parte de esa fuerza a las células que le siguen. Guarda semejanza con el juego de tirar la soga (sokatira): cada jugador aplica una fuerza que se transmite, a través de la cuerda, al jugador siguiente. Experimentos recientes en células epiteliales renales sugieren que éste es el mecanismo por el cual este tipo celular migra de forma colectiva.



tiva. Una función paradigmática en la cual la migración individual desempeña una función central es la defensa inmunitaria. Durante este proceso, células altamente mótiles (neutrófilos y macrófagos) detectan, persiguen y eliminan patógenos potencialmente infecciosos. Para migrar individualmente, esas células combinan de forma cíclica cuatro procesos biomecánicos: extensión del polo anterior, adhesión de éste a la matriz extracelular, retracción del polo posterior y contracción de la maquinaria actina-miosina intracelular. Si bien cada uno de estos procesos es aún objeto de intensa investigación, empiezan a conocerse sus mecanismos básicos.

Ello contrasta con la migración colectiva, probablemente el modo migratorio más común. Durante las primeras semanas del desarrollo embrionario humano, las tres capas germinales que forman el embrión realizan una compleja "danza" colectiva (gastrulación) que da lugar a la estructura de la que derivarán los órganos del individuo. Asimismo, durante el proceso metastásico en varios carcinomas, las células tumorales invaden tejidos no a modo de entidades individuales sino como grupos cohesivos; este tipo de invasión colectiva permite a las células metastásicas crear concentraciones elevadas de factores premigratorios, mientras protegen las células interiores del grupo contra el asalto inmunitario.

Nanofuerzas

¿Cómo se explica nuestro abrumador desconocimiento de los mecanismos que gobiernan un proceso tan fundamental como la migración celular colectiva? La primera razón es la complejidad. Durante la migración colectiva, cada célula interacciona no sólo con su entorno inerte sino también con las células vecinas. Esta interacción implica el intercambio de centenares de señales bioquímicas que regulan la aplicación de fuerzas físicas que finalmente causan el movimiento cohesivo de las células. La segunda razón reside en la dificultad experimental. Las fuerzas que las células ejercen sobre sus vecinas y el entorno para propulsarse son de unos pocos nanonewtons, es decir, más de mil millones de veces inferiores a las fuerzas habituales en nuestra rutina diaria.

Afortunadamente, hoy en día nos hallamos en condiciones de afrontar esas dificultades. Por un lado, el avance de la genómica y la proteómica nos permite identificar de forma sistemática cuáles son los genes y proteínas involucrados en la regulación de la migración celular. Por otro lado, las herramientas que proporciona la biología de sistemas nos permiten modelizar de forma cuantitativa la interacción entre esos genes y proteínas. Por fin, la bionanotecnología nos permite medir fuerzas en el rango del nanonewton e incluso del piconewton.

Todas esas disciplinas involucran una colaboración estrecha entre científicos de campos tan variados como la física, la ingeniería, la informática, la bioquímica, la biología y la medicina. Esta colaboración ya ha empezado a dar sus frutos. En fecha reciente se han publicado las primeras listas completas de genes y proteínas que regulan la migración colectiva; para ello se han empleado nuevos algoritmos bioinformáticos que han permitido establecer relaciones secuenciales entre cada uno de los elementos. Asimismo, se han elaborado mapas de las fuerzas que las células ejercen sobre su entorno; éstos nos ayudan a comprender el modo en que las células colaboran físicamente para avanzar en grupo.

A pesar de estos avances, nos encontramos aún al principio de la gran tarea que representa desentrañar los mecanismos que gobiernan la migración celular colectiva. La comprensión de estos mecanismos anticipa, a medio plazo, el desarrollo de terapias para la prevención y el tratamiento de algunas de las enfermedades más comunes y devastadoras de la actualidad.

Xavier Trepat
Universidad de Barcelona
Instituto de Bioingeniería de Cataluña
Ciber de Enfermedades Respiratorias

EL ORIGEN DEL UNIVERSO

MICHAEL S. TURNER

Los cosmólogos se acercan a los procesos que crearon y dieron forma al universo

CONCEPTOS BASICOS

- Nuestro universo comenzó con una "gran explosión caliente" (sin que deba entenderse literalmente esta expresión) hace 13.700 millones de años. Desde entonces se ha estado expandiendo y enfriando. En su evolución, ha pasado de sopa informe de partículas elementales al cosmos rico en estructuras de hoy día.
- Fue el primer microsegundo el período formativo en el que la materia dominó sobre la antimateria, se plantaron las semillas de las galaxias y otras estructuras, y la materia oscura fue creada (el material aún sin identificar que mantiene unidas todas esas estructuras).
- El futuro del universo depende de la energía oscura, una forma desconocida de energía por la que la expansión cósmica empezó a acelerarse hace unos pocos miles de millones de años.

El universo es enorme, en el espacio y en el tiempo. Durante buena parte de la historia de la humanidad ha estado fuera del alcance de nuestros instrumentos y de nuestras mentes. Dejó de ser así en el siglo xx. Debemos ese cambio radical a ideas brillantes, como la relatividad general de Einstein y las teorías de las partículas elementales, pero también a instrumentos más potentes, desde los reflectores de 2,54 y 5,08 metros de George Ellery Hale, con los que vimos más allá de la Vía Láctea, hasta el Telescopio Espacial Hubble, que nos ha mostrado el nacimiento de las galaxias.

En el curso de los últimos 20 años, el progreso se ha acelerado: hemos sabido que la materia oscura no está hecha de átomos comunes, se ha descubierto que existe una energía oscura y han ido apareciendo nuevas ideas muy atrevidas, como la inflación cósmica y el multiverso.

El universo de hace cien años era sencillo: eterno, invariable, formado por una única galaxia y con unos pocos millones de estrellas visibles. El cuadro es hoy mucho más completo y rico. El cosmos nació hace 13.700 millones de años con la "gran explosión" (el *Big Bang*), expresión que no debe entenderse literalmente. Una fracción de segundo después, el universo no era más que una informe sopa caliente de partículas elementales (quarks y leptones). Durante la expansión y enfriamiento, se fueron desarrollando los niveles de estructura uno tras otro: los protones y neutrones, los núcleos de los átomos, las galaxias, los cúmulos de galaxias y, finalmente, los supercúmulos.

La parte observable del universo contiene unos cien mil millones de galaxias, cada una con cien mil millones de estrellas y un número similar de planetas. Las galaxias mismas no se dispersan sino por la gravedad de la misteriosa materia oscura. El universo sigue expandiéndose, a un ritmo acelerado, guiado por la energía oscura, una forma de energía aún más misteriosa cuya fuerza de gravedad repele en vez de atraer.

La historia de nuestro universo es la historia de una evolución que va de la simplicidad de una sopa de quarks a la complejidad que observamos hoy día en las galaxias, las estrellas, los planetas y la vida, que fueron apareciendo a lo largo de miles de millones de años bajo la guía de las leyes básicas de la física. En su viaje de vuelta al comienzo de la creación, los cosmólogos recorren primero la historia bien conocida del universo, hasta el primer microsegundo; desde ahí hasta los 10^{-34} segundos después del inicio, hay ideas bien formadas pero no consolidadas; y finalmente llegan a los momentos más primitivos de la creación, para los que no contamos más que con meras especulaciones.

Aunque el origen último del universo todavía se nos escapa, se han tanteado algunas conjeturas, incluida la noción de multiverso, según la cual el universo está formado por un número infinito de subuniversos sin relación alguna entre sí.

HOLLY LINDEM (*fotoilustración*); GENE BURKHARDT (*diseño*)


12 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

El autor

Michael S. Turner fue uno de los primeros en unir la física de partículas, la astrofísica y la cosmología. Enseña en el Instituto Kavli de Física Cosmológica en la Universidad de Chicago. De 2003 a 2006 fue responsable del área de matemáticas y física de la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos. Entre sus honores se cuentan el premio Warner de la Sociedad Astronómica Norteamericana, el premio Lilienfeld de la Sociedad Norteamericana de Física, y el premio Klopsted de la Asociación Norteamericana de Profesores de Física.

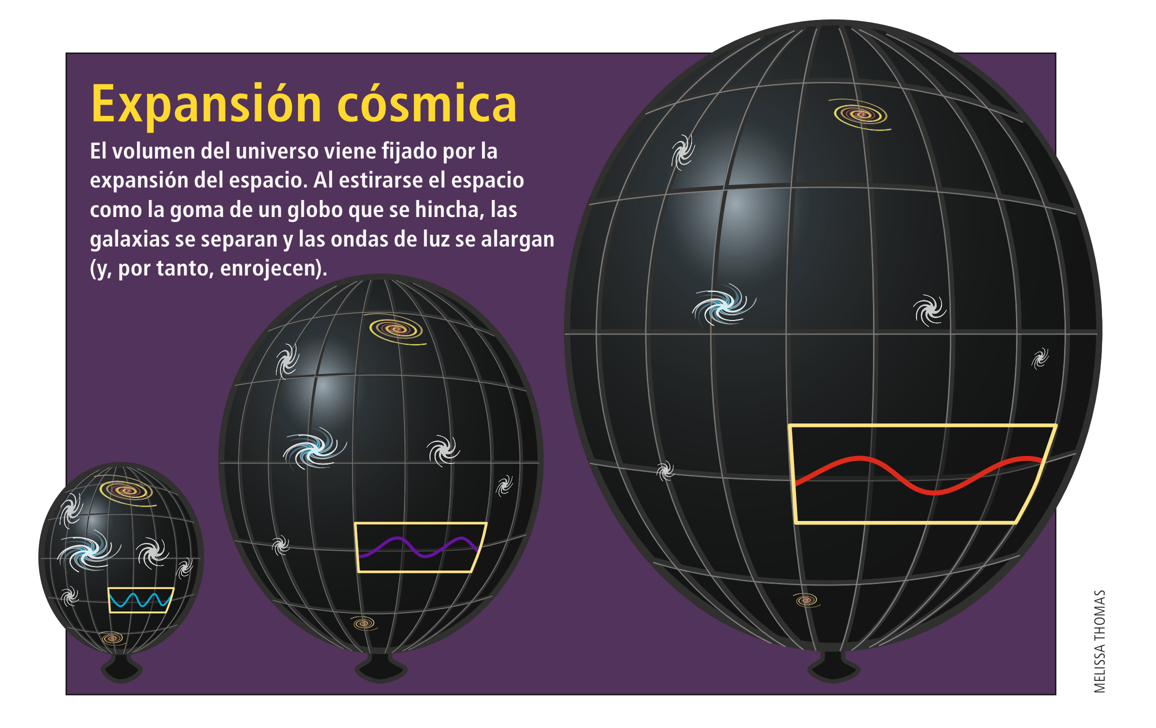
Universo en expansión

En 1924, con el telescopio Hooker de 2,54 metros de Monte Wilson, Edwin Hubble demostró que las nebulosas borrosas, objeto de cábalas durante siglos, eran galaxias. Como la nuestra. Así multiplicó el tamaño del universo por cien mil millones. Unos pocos años más tarde, resolvió que las galaxias se iban separando unas de otras de acuerdo con cierta relación matemática (llamada hoy ley de Hubble), según la cual las galaxias más lejanas se alejan más deprisa. Es la ley de Hubble, extrapolada hasta los primeros tiempos, la que apunta a una gran explosión hace 13.700 millones de años.

La ley de Hubble encontró una interpretación sencilla en la relatividad general: el espacio mismo se está expandiendo y se lleva consigo a las galaxias (*véase el recuadro* "Expansión cósmica"). La luz se está también estirando o corriendo hacia el rojo, proceso que absorbe energía, por lo que el universo se enfría con la expansión. La expansión cósmica proporciona la pauta de cómo ha llegado el universo a ser lo que es hoy. Mirando hacia atrás en el tiempo, el universo se presenta más denso y caliente, más extremo y sencillo. Cuando exploramos los orígenes, examinamos los mecanismos internos de la naturaleza, porque disponemos entonces del acelerador más poderoso, la propia gran explosión.

Al mirar al espacio con los telescopios, se indaga en el pasado, y cuanto mayor es el telescopio, más atrás en el tiempo se remonta. La luz de las galaxias lejanas descubre una época temprana; la cantidad que la luz se ha desplazado al rojo indica cuánto ha crecido el universo mientras tanto. El récord actual está en un desplazamiento al rojo de ocho; aquella luz partió cuando el universo era sólo una novena parte del de hoy en tamaño y tenía apenas unos cientos de millones de años. Los instrumentos —el Telescopio Espacial Hubble, los telescopios Keck de 10 metros en Mauna Kea— nos trasladan a la época en que se formaron las galaxias, unos pocos miles de millones de años después de la gran explosión. La luz de tiempos más remotos está tan desplazada al rojo, que hay que buscarla en el infrarrojo y en bandas de radio. Los próximos telescopios, entre ellos el Telescopio Espacial James Webb, un infrarrojo de 6,5 metros, y la Gran Red Milimétrica de Atacama (ALMA), un conjunto de 64 radioantenas sito en el norte de Chile, nos llevarán al nacimiento mismo de las primeras estrellas y galaxias.

Las simulaciones por computadora sugieren que esas primeras estrellas y galaxias se formaron cuando el universo contaba unos 100 millones de años. Antes había atravesado una "edad oscura", en la que todo era básicamente negro. Había una papilla sin estructuras, cinco partes de materia oscura y una parte de hidrógeno y helio, cada vez menos espesa conforme el universo se expandía. La materia tenía densidades ligeramente diferentes; la gravedad actuó amplificando esas diferencias: las regiones más densas se expandieron más despacio que las menos densas. Al cabo de cien millones de años, las regiones más densas dejaron de expandirse y empezaron a colapsar. Cada una de estas estructuras albergaba materia en una cantidad equivalente a mil millones



de masas solares. Fueron los primeros objetos del cosmos ligados por gravedad.

La materia oscura aportaba el grueso de la masa, pero era, como su nombre indica, incapaz de emitir o absorber luz, por lo que permaneció en nubes extensas. El gas de hidrógeno y helio, por el contrario, emitía luz y perdía energía, y se concentraba en el centro de la nube. Con el tiempo colapsó y formó estrellas. Estas primeras estrellas tenían mucha más masa que las de hoy, más de cien veces la del Sol. Su vida era muy corta; enseguida explotaban y liberaban al espacio los primeros elementos pesados. A lo largo de los siguientes miles de millones de años, la fuerza de gravedad transformó las nubes de más de un millón de masas solares en las primeras galaxias.

Las redes gigantes de radioantenas con un área colectora total igual a un kilómetro cuadrado deberían poder captar la radiación procedente de las nubes de hidrógeno primordial, fuertemente desplazadas al rojo por la expansión. Una vez se las haya construido, observarán cómo ionizó el hidrógeno la primera generación de estrellas y galaxias y puso fin a la edad oscura [*véase* "La edad oscura del universo", por Abraham Loeb; Investigación y Ciencia, enero 2007].

Débil brillo de un comienzo caliente

El resplandor de la gran explosión caliente nos llega desde más allá de la edad oscura, con un desplazamiento al rojo de 1100. Esta radiación está desplazada del visible (era originalmente una luz naranja-rojiza) hasta más allá del infrarrojo, hasta las microondas. Lo que observamos de ese momento es una pared de luz de microondas que inunda el cielo, la radiación del fondo cósmico de microondas (FCM), descubierta en 1964 por Arno Penzias y Robert Wilson. Proporciona una visión del universo a sus 380.000 años, el período en que se formaron los átomos.

Antes de ese momento, el universo no era más que una sopa casi uniforme de núcleos atómicos, electrones y fotones. Cuando se enfrió hasta una temperatura de unos 3000 kelvin, los núcleos y los electrones se combinaron en átomos. Los electrones dejaron de dispersar los fotones, que atravesaron así el espacio sin que se les obstaculizase, hasta llegar a nosotros y mostrarnos el universo de una época anterior a la existencia de estrellas y galaxias.

En 1992, el satélite Explorador del Fondo Cósmico, de la NASA, descubrió que la intensidad del FCM presentaba pequeñas variaciones —del orden del 0,001 por ciento— que se correspondían con irregularidades en la distribución de la materia. El grado de esas irregularidades primordiales bastó para que hiciesen de semillas de las galaxias y grandes estructuras que surgirían más tarde como consecuencia de la acción de la gravedad. El patrón de las variaciones del FCM en el firmamento encerraba también información sobre algunas propiedades básicas del universo, como su densidad global y composición, y sobre los primeros momentos; el estudio detallado de las variaciones ha revelado mucho acerca del universo (*véase la figura 3*).

Si proyectásemos hacia atrás la película de la evolución del universo a partir de ese punto, el plasma primordial se volvería más y más caliente y denso. Antes de los 100.000 años, la densidad de la radiación superaba la de la materia e impedía que ésta se agrupara. Por tanto, ese momento marcó el inicio del ensamblaje gravitatorio de las estructuras que hoy apreciamos. Aún antes, cuando el universo

Antes de la gran explosión

Se desconoce todavía cómo se inició el universo, pero la pregunta ha entrado ya en el terreno científico, donde se estudia una serie de hipótesis bastante especulativas.

A No existió ninguna era anterior
La materia, la energía, el espacio y el tiempo comenzaron de manera abrupta con la explosión.

B Emergencia cuántica
El espacio común y el tiempo se desarrollaron a partir de un estado primitivo descrito por la teoría cuántica de la gravedad.

10^{-43} segundos
La era de Planck: tiempo más primitivo con significado; el espacio y el tiempo tomaron forma.

C Multiverso
Nuestro universo y otros brotaron de un espacio eterno.

D Universo cíclico
La gran explosión es el último estado de un eterno ciclo de expansión, colapso y nueva expansión.

(del ciclo anterior)



1. EL CAMPO ULTRAPROFUNDO DEL HUBBLE, la imagen óptica más sensible del cosmos jamás tomada, muestra más de mil galaxias en sus primeros estadios de formación.

R. THOMPSON *Universidad de Arizona*, NASA Y ESA (*Campo Ultraprofundo de Hubble*)

La línea del tiempo cósmico continúa con una serie de eventos bien establecidos hasta llegar al día presente.

Primeros momentos de la gran explosión → Formación de átomos



10^{-35} segundos
La inflación cósmica genera un gran parche continuo de espacio lleno de una sopa grumosa de quarks

10^{-30} segundos
Se sintetiza uno de los posibles tipos de materia oscura (axiones)

10^{-11} segundos
La materia vence a la antimateria

10^{-10} segundos
Se sintetiza un segundo tipo posible de materia oscura (los neutralinos)

10^{-5} segundos
Los protones y los neutrones se forman a partir de los quarks

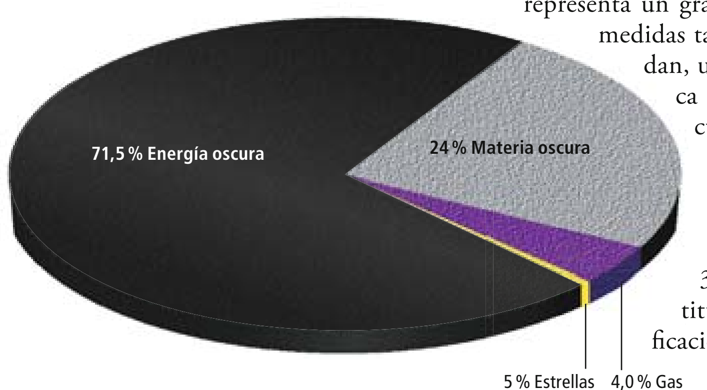
0,01-300 segundos
A partir de los protones y neutrones se forman el helio, el litio y los núcleos pesados del hidrógeno

380.000 años
Los átomos formados por los núcleos y los electrones liberaron la radiación del fondo cósmico de microondas

tenía menos de un segundo, los núcleos atómicos no se habían formado aún; sólo existían sus partículas constituyentes, es decir, los protones y los neutrones. Los núcleos aparecieron cuando el universo contaba con una edad de pocos segundos y las temperaturas y densidades eran las adecuadas para las reacciones nucleares. Este proceso de nucleosíntesis sólo fabricó los elementos más ligeros de la tabla periódica: mucho helio (un 25 % de la masa atómica), y cantidades más pequeñas de litio y de los isótopos deuterio y helio 3. El resto del plasma (un 75 %) permaneció en forma de protones, que con el tiempo se convirtieron en átomos de hidrógeno. Todos los demás elementos de la tabla periódica aparecieron en las estrellas y las explosiones estelares miles de millones de años más tarde.

La teoría de la nucleosíntesis predice con precisión las abundancias de los elementos y de los isótopos, medidas en las muestras más primitivas del universo: las estrellas más viejas y las nubes gaseosas de alto corrimiento hacia el rojo. La proporción de deuterio, muy sensible a la densidad de átomos del universo, desempeña una función especial: indica que la materia común representa sólo el 4,5 ± 0,1 por ciento de la densidad de energía. (El resto es materia oscura y energía oscura). Esta estimación coincide con la composición que se deduce del análisis del FCM. Tal concordancia representa un gran triunfo. Que dos medidas tan diferentes coincidan, una basada en la física de la nucleosíntesis cuando el universo tenía un segundo y la otra en la física atómica de cuando el universo contaba 380.000 años, constituye una sólida ratificación, no sólo de nuestro modelo de la evolución del universo, sino también de la física moderna.

2. LA INMENSA MAYORIA DEL UNIVERSO está formada por energía oscura y materia oscura, pero aún no se sabe en qué consisten la una y la otra. La materia común, de que están hechas las estrellas, los planetas y el gas interestelar, sólo suma una pequeña fracción.



Respuestas en la sopa de quarks

Antes de que hubiera un microsegundo, ni los protones ni los neutrones podrían haberse dado; el universo era una sopa de los ladrillos básicos de la naturaleza: quarks, leptones y transportadores de energía (fotones, bosones W y Z y gluones). Estamos seguros de que existió la sopa de quarks: los experimentos en los aceleradores de partículas han recreado unas condiciones similares aquí, en la Tierra de hoy [*véase* "Los primeros microsegundos", por Michael Riordan y William A. Zajc; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2006].

Para explorar esa época, los cosmólogos se apoyan no sólo en telescopios mayores y mejores, sino también en las potentes ideas de la física de partículas. Tras la constitución del modelo estándar de la física de partículas hace 30 años, se han propuesto ideas atrevidas, entre ellas la teoría de cuerdas, para unificar partículas y fuerzas fundamentales dispares. Estas nuevas ideas tienen consecuencias cosmológicas tan considerables como las tuvo la noción de gran explosión caliente. Señalan conexiones más profundas e inesperadas entre el mundo de lo muy grande y lo muy pequeño. Se están bosquejando las respuestas a tres preguntas: la naturaleza de la materia oscura, la asimetría entre la materia y la antimateria, y el origen mismo de la sopa irregular de quarks.

Ahora se piensa que la sopa primitiva de quarks fue el lugar de nacimiento de la materia oscura. La identidad de la materia oscura sigue sin aclararse, pero su existencia está bien establecida. Nuestra galaxia —y cualquier otra galaxia, y los cúmulos de galaxias— se mantiene unida por la gravedad de la invisible materia oscura. Sea lo que sea la materia oscura, debe interactuar muy débilmente con la materia común; de lo contrario, se habría manifestado de

MELISSA THOMAS

Epoca oscura → Era moderna

380.000-300 millones de años
La gravedad continúa amplificando las diferencias de densidad en el gas que llena el espacio

300 millones de años
Se forman las primeras estrellas y galaxias

1000 millones de años
Límite de las observaciones actuales (los objetos de mayor desplazamiento al rojo)

3000 millones de años
Se forman los cúmulos de galaxias; culmina la formación estelar

9000 millones de años
Se forma el sistema solar

10.000 millones de años
La energía oscura toma el control y la expansión comienza a acelerarse

13.700 millones de años
Hoy

alguna manera. Los intentos por encontrar un marco unificador de las fuerzas y las partículas de la naturaleza han predicho la presencia de partículas estables y duraderas que podrían constituir la materia oscura. Esas partículas serían los remanentes de la sopa de quarks; se cree que interaccionan muy débilmente con los átomos.

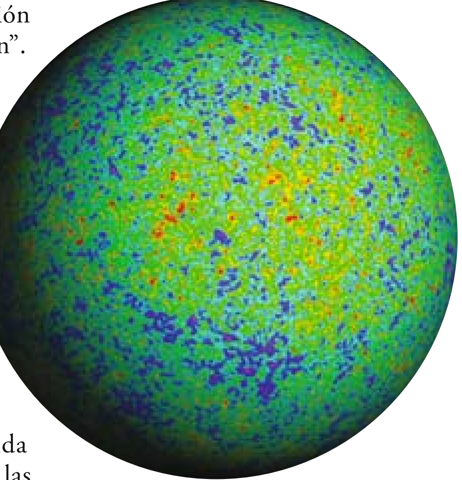
Uno de los candidatos es el neutralino, la más ligera de una supuesta nueva clase de partículas, homólogas de las partículas conocidas pero más pesadas. La masa del neutralino sería entre 100 y 1000 veces la del protón; quedaría justo al alcance de los experimentos que se ejecutarán en el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, cerca de Ginebra. Además, se han construido detectores subterráneos ultrasensibles y se ha lanzado al espacio una variedad de satélites y globos con el fin de buscar esta partícula y los subproductos de sus interacciones.

El segundo candidato es el axión, una partícula superligera, cuya masa es una billonésima de la masa del electrón. Su existencia se infiere de las sutilezas del comportamiento de los quarks descritas por el modelo estándar. Los esfuerzos por detectarlo parten del hecho de que un axión se puede transformar en un fotón bajo campos magnéticos muy intensos. Neutralinos y axiones tendrían la importante propiedad de ser, en términos técnicos, "fríos". Aunque se formasen en condiciones muy calientes, sus movimientos serían lentos y, por tanto, las galaxias los habrían capturado con facilidad.

Puede que la sopa de quarks primitiva guarde también el porqué de que el universo actual contenga materia sólo, en vez de materia y antimateria. Se piensa que el universo original contenía cantidades iguales de ambas, hasta que en un momento concreto se produjo un ligero exceso de la materia, aproximadamente un quark de más por cada mil millones de antiquarks. Tal desequilibrio aseguró la supervivencia de un número suficiente de quarks frente a la aniquilación con los antiquarks en la expansión y enfriamiento del universo. Hace más de 40 años que los experimentos de los aceleradores revelaron que las leyes de la física están siempre ligeramente sesgadas a favor de la materia. Aunque aún hay que entender una serie de interacciones muy tempranas entre las partículas, ese pequeño sesgo condujo a la creación del exceso de quarks.

Se piensa que la propia sopa de quarks tuvo su origen en un momento muy temprano, quizás a los 10^{-34} segundos después de la gran explosión, en la apoteosis de expansión cósmica que recibe el nombre de "inflación". Tal hiperexpansión, guiada por la energía de un nuevo campo (análogo en líneas muy generales al campo electromagnético), el inflatón, explicaría algunas propiedades básicas del cosmos; por ejemplo, la uniformidad global y los grumos que hicieron de semillas de las galaxias y otras estructuras del universo. Al decaer el inflatón, liberó el resto de su energía en los quarks y otras partículas, generando a la vez el calor de la gran explosión y la sopa de quarks.

La inflación conduce a una profunda conexión entre los quarks y el cosmos: las fluctuaciones cuánticas en el campo del inflatón, que eran de escala subatómica, pasaron a tener tamaños astrofísicos con la rápida expansión, convirtiéndose así en las semillas de toda estructura observada hoy día. En otras palabras, el patrón detectado en el cielo del fondo cósmico de microondas es la imagen a escala gigantesca de un mundo subatómico. Las observaciones del FCM coinciden con esta predicción, lo que evidencia que la inflación, o algo parecido, ocurrió muy pronto en la historia del universo.



3. LA RADIACION DEL FONDO COSMICO DE MICROONDAS es una imagen del universo a la edad de 380.000 años. Las pequeñas variaciones en la intensidad de la radiación (*codificada con colores en la figura*) constituyen la piedra Rosetta cósmica que revela parámetros cruciales del universo, como su edad, densidad, geometría y composición química global.

MAX TEGMARK Y ANGELICA DE OLIVERA-COSTA (*radiación cósmica de microondas*)

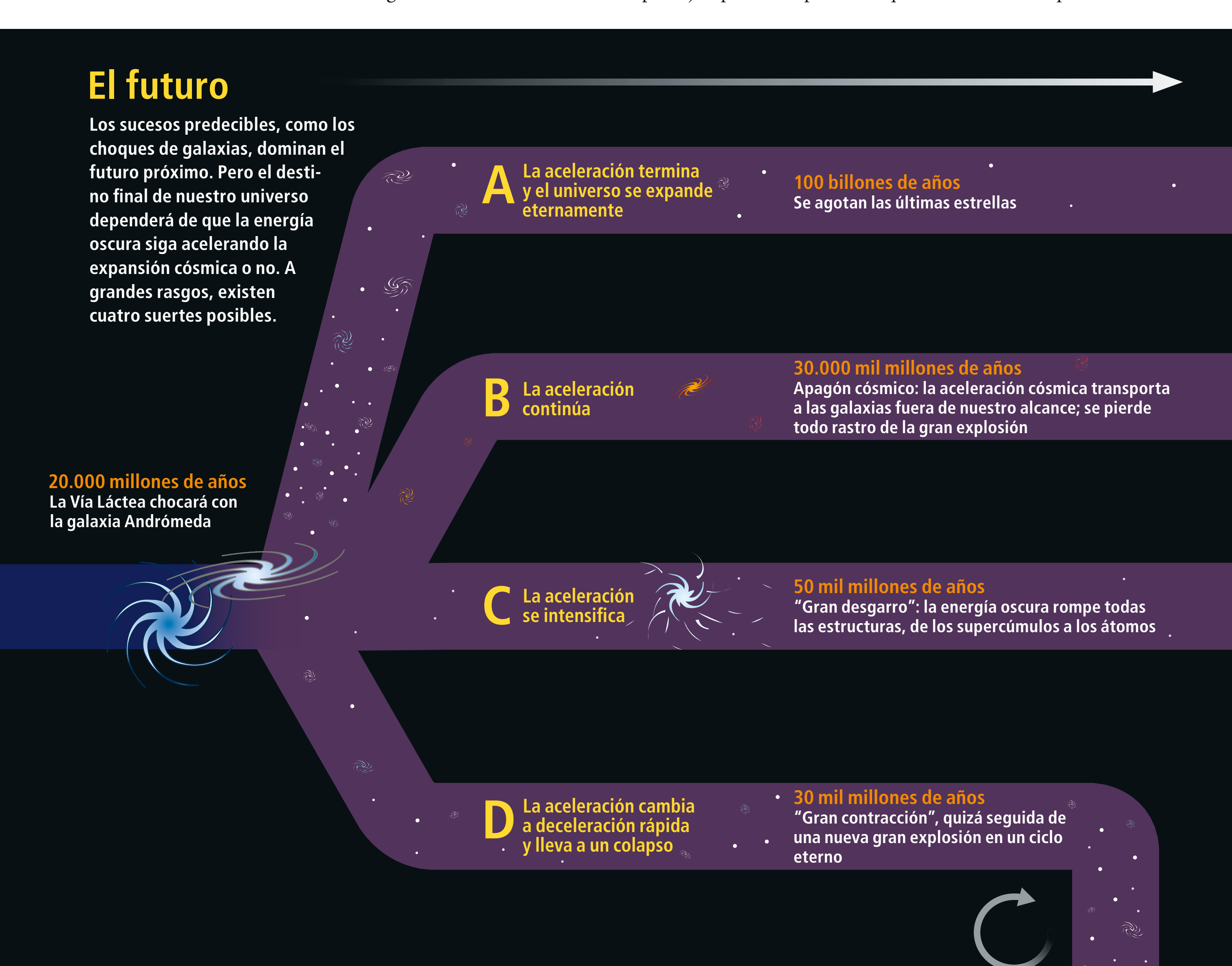
El nacimiento del universo

Los cosmólogos intentan avanzar más en nuestra comprensión de la génesis del universo. Aquí las ideas parecen menos firmes. La teoría de la relatividad general de Einstein ha sido el pilar teórico fundamental durante un siglo de progreso en el conocimiento de la evolución del universo. Sin embargo, no es coherente con el otro pilar de la física contemporánea, la teoría cuántica. El mayor desafío a que se enfrenta la física es reconciliar las dos teorías. Sólo con una teoría unificada estaremos capacitados para comprender los primeros momentos del universo, la llamada era de Planck, anterior a los 10^{-43} segundos, cuando el espaciotiempo tomó forma.

Algunas tentativas de teoría unificada han aportado interesantes conjeturas sobre nuestros orígenes. La teoría de cuerdas, por ejemplo, predice la existencia de más dimensiones espaciales y quizá de otros universos inmersos en un espacio mayor. Lo que llamamos gran explosión pudo haber sido el choque de nuestro universo con otro universo [*véase* "El universo antes de la gran explosión", por Gabriele Veneziano; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2004]. El matrimonio entre la teoría de cuerdas y el concepto de la inflación produce la idea más curiosa de todas, la de multiverso: el universo constaría de un número infinito de piezas desconectadas, cada una con sus propias leyes locales de la física [*véase* "El paisaje de la teoría de cuerdas", por Raphael Bousso y Joseph Polchinski; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2004].

El concepto del multiverso, aún en su infancia, se funda en dos hallazgos teóricos clave. El primero, que las ecuaciones que describen

MELISSA THOMAS



En la oscuridad

La característica central de nuestro concepto actual del universo, así como su mayor misterio, es la energía oscura, una forma extraña de energía descubierta recientemente y origen de la aceleración de la expansión cósmica. La energía oscura tomó control sobre la materia hace unos pocos miles de millones de años. Con anterioridad, la expansión se había ido frenando a consecuencia de la atracción gravitatoria ejercida por la materia, y la gravedad fue forjando estructuras, de las galaxias a los supercúmulos. Hoy, por la influencia de la energía oscura, no se pueden generar estructuras mayores que los supercúmulos. Si la energía oscura hubiera dominado sobre la materia cuando el universo contaba sólo cien millones de años, habría cesado la formación de cualquier estructura, incluso antes de que se constituyesen las galaxias, y no estaríamos aquí.

Los cosmólogos tienen sólo ideas rudimentarias de qué podría ser la energía oscura. Para acelerar la expansión es necesario que haya una fuerza repulsiva; la teoría de la relatividad general de Einstein predice que la gravedad de una forma de energía extremadamente elástica puede llegar a ser repulsiva. La energía cuántica que llena el espacio vacío podría actuar de esa manera. El problema estriba en que las estimaciones teóricas de la cantidad de energía cuántica de vacío no encajan con la cantidad medida en las observaciones: son muchos órdenes de magnitud superiores.

Como opción alternativa, la causa de la aceleración cósmica podría ser no un nuevo tipo de energía, sino un proceso que imite sus efectos: quizá la relatividad general no sea válida en ese respecto o influyan dimensiones espaciales no vistas [*véase* "La constante cosmológica", por Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre 2004].

Si el universo continúa acelerándose al ritmo actual, en unos 30.000 millones de años habrá desaparecido toda traza de la gran explosión [*véase* "¿El fin de la cosmología?", por Lawrence M. Krauss y Robert J. Scherrer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 2008]. La luz de todas las galaxias, salvo la de unas pocas cercanas, estará demasiado desplazada al rojo para ser detectada; la temperatura de la radiación del fondo cósmico resultará demasiado baja para ser medida; y el universo se parecerá al que conocían los astrónomos de hace cien años, antes de que los instrumentos descubrieran el universo que conocemos hoy.

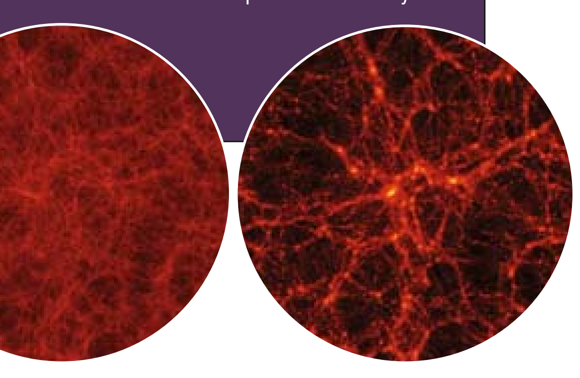
la inflación sugieren que, si una vez hubo inflación, debería pasar una y otra vez, con un número infinito de regiones inflacionarias creadas a lo largo del tiempo. Nada puede viajar entre estas regiones, por lo que no tienen efecto unas sobre otras. El segundo, que la teoría de cuerdas sugiere que esas regiones presentan parámetros físicos distintos, incluidos el número de dimensiones espaciales y los tipos de partículas estables.

La idea del multiverso da respuestas novedosas a dos de las mayores preguntas de la ciencia: qué había antes de la gran explosión y por qué las leyes de la física son como son (la celebre reflexión de Einstein sobre "si Dios podía elegir" las leyes). El multiverso hace discutible la pregunta del antes de la gran explosión, puesto que habrían existido infinitas grandes explosiones, cada una desencadenada por su propia inflación. De igual modo, la pregunta de Einstein carecería de sentido: con la existencia de un número infinito de universos, todas las combinaciones posibles de las leyes de la física vienen a ser, por lo que no hay ninguna razón particular por la que nuestro universo tenga las leyes que tiene.

Los cosmólogos muestran sentimientos encontrados ante el multiverso. Si los subuniversos desconectados están realmente incomunicados, no hay esperanza de probar su existencia; parecerían encontrarse más allá del reino de la ciencia. Parte de mí quiere gritar: "¡Un universo cada vez, por favor!" Por otra parte, el multiverso soluciona varios problemas conceptuales. Si la idea fuese cierta, la multiplicación del tamaño de universo por cien mil millones que efectuó Hubble, y el desplazamiento de la Tierra del centro del universo en el siglo XVI por Copérnico, parecerían, a su lado, avances diminutos en el conocimiento de nuestro lugar en el cosmos.

La cosmología moderna nos humilla. Estamos hechos de protones, neutrones y electrones, que apenas representan el 4,5 por ciento del universo, y existimos sólo por unas sutiles conexiones entre lo muy pequeño y lo muy grande. Los sucesos guiados por las leyes microscópicas de la física permitieron que la materia dominara a la antimateria, generaron las irregularidades de las que nacieron las galaxias, llenaron el espacio de las partículas de materia oscura que proporcionan una infraestructura gravitatoria e hicieron que la materia oscura pudiera fabricar galaxias antes de que la energía oscura ganase importancia y la expansión se acelerara (*véase el recuadro* "En la oscuridad").

Al mismo tiempo, la cosmología, por propia naturaleza, es arrogante. La idea de que podamos entender algo tan vasto como el espacio y el tiempo parece extravagante. Esta curiosa mezcla de humillación y arrogancia nos ha llevado muy lejos a lo largo del siglo pasado en nuestro conocimiento del universo presente y su origen. Soy positivo; espero más avances en los próximos años. Creo que estamos viviendo una época dorada de la cosmología.



4. SI EL UNIVERSO tuviera aún más energía oscura, permanecería casi sin formas (*izquierda*), sin las estructuras que observamos hoy día (*derecha*).

LIANG GAO, CARLOS FRENK Y ADRIAN JENKINS *Instituto de Cosmología Computacional, Universidad de Durham*

Bibliografía complementaria

THE EARLY UNIVERSE. Edward W. Kolb y Michael S. Turner. Westview Press, 1994.

THE INFLATIONARY UNIVERSE. Alan Guth. Basic, 1998.

QUARKS AND THE COSMOS. Michael S. Turner en *Science*, vol. 315, págs. 59-61; 5 de enero, 2007.

DARK ENERGY AND THE ACCELERATING UNIVERSE. Joshua Frieman, Michael S. Turner y Dragan Huterer en *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, vol. 46, págs. 385-432; 2008.

EL ORIGEN GALILEANO DE LA COSMOLOGIA MODERNA

MATTHIAS SCHEMMEL

La invención del telescopio y la primera mirada telescópica de Galileo al cielo en el año 1609 agudizaron la contienda entre los modelos cosmológicos

El invento del telescopio hace cuatrocientos años coincidió con un cambio radical en la cosmología. Aunque el viejo modelo geocéntrico del mundo predominaba aún, el nuevo modelo heliocéntrico tenía ya ciertos defensores, algunos tan conspicuos como Johannes Kepler. El *Sidereus Nuncius* ("Mensaje —o mensajero— de las estrellas"), de marzo del 1610, la primera publicación de unas observaciones telescópicas detalladas, no fue concebido por su autor, Galileo Galilei, sólo como una contribución al debate religioso y político sobre el verdadero sistema del mundo. Pero mientras las dudas iniciales sobre la posibilidad y verdad de las observaciones telescópicas relatadas se disiparon pasado cierto tiempo, las conclusiones cosmológicas que Galileo extrajo de sus observaciones fueron objeto de controversia durante décadas. ¿Qué influencia tuvo la invención del telescopio en el cambio de la cosmología?

El telescopio y el cambio de la cosmología

La evolución de nuestro conocimiento y representación del universo está ligada estrechamente al desarrollo de las técnicas de observación, asociadas a su vez a los progresos del telescopio. Así fue con los grandes telescopios ópticos en EE.UU., que en los años veinte del siglo XX resolvieron en estrellas individuales las regiones externas de galaxias vecinas y, de ese modo, pusieron de manifiesto lo que hasta entonces sólo había sido mera especulación: que los objetos a los que se llamaba "nebulosas" eran sistemas estelares extragalácticos, "universos isla", como nuestra propia galaxia. El hallazgo ensanchó el universo conocido en varios órdenes de magnitud.

Con ayuda del análisis espectral de la luz suministrada por los telescopios, desarrollado en el curso del siglo XIX, se descubrió un desplazamiento sistemático hacia el rojo de las líneas espectrales de la luz que nos llega de las galaxias lejanas. Este desplazamiento del espectro hacia el dominio de las longitudes de onda largas se entiende hoy que es una consecuencia de la expansión general del universo.

La relatividad general proporciona los fundamentos teóricos para entender la expansión cósmica. La comprobación empírica de la validez de esa teoría se basó, durante largo tiempo, exclusivamente, en observaciones telescópicas. Así, la desviación de Mercurio de su órbita newtoniana, conocida ya desde mediados del siglo XIX, ofreció una primera validación, y la expedición del eclipse solar de 1919 que dirigió Arthur Eddington condujo a un amplio reconoci-

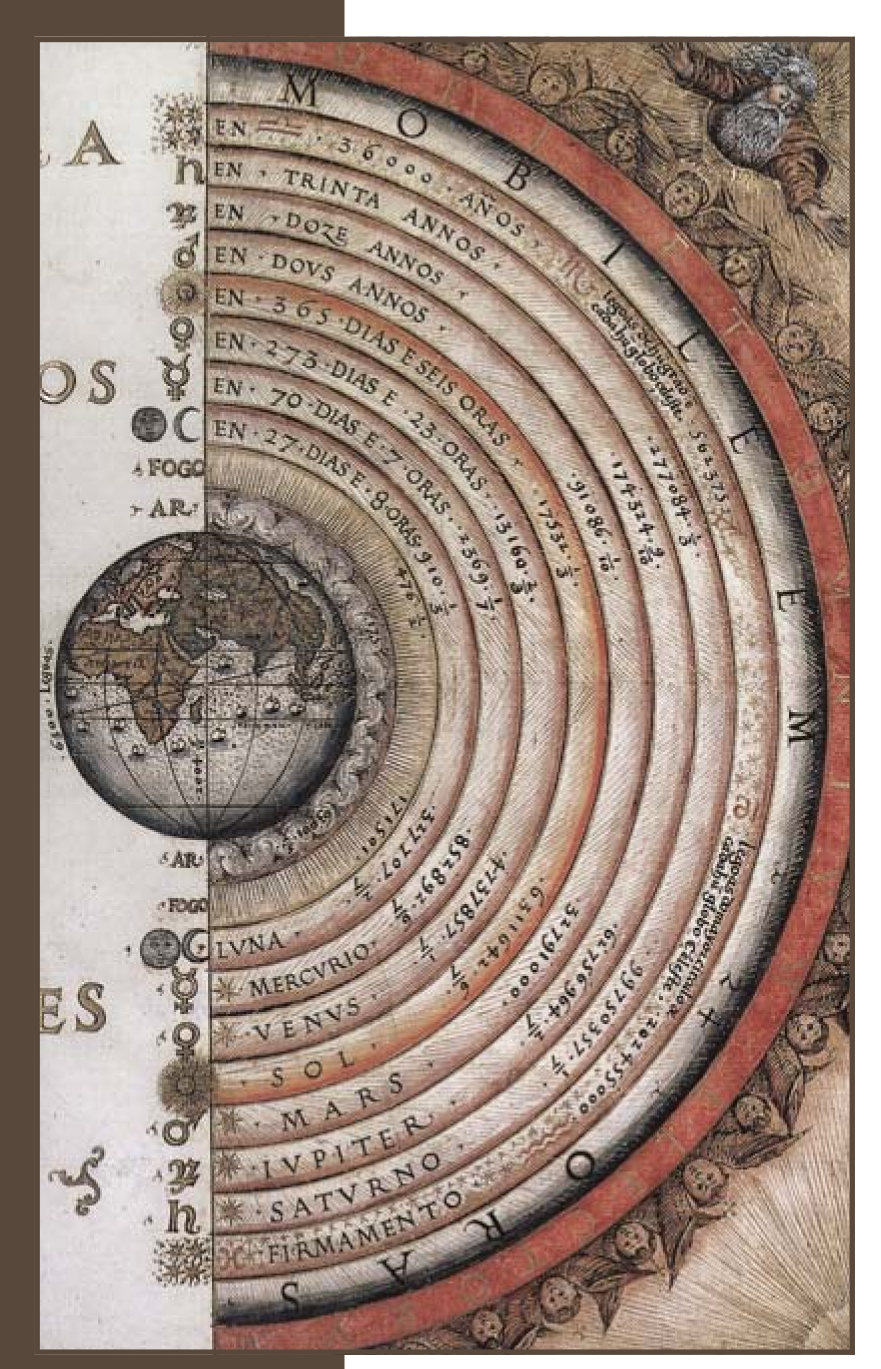
1. COPIA de un telescopio de Galileo, de alrededor de 1610.

INSTITUTO Y MUSEO DE HISTORIA DE LA CIENCIA, FLORENCIA

CONCEPTOS BASICOS

- El telescopio ha sido esencial en el desarrollo de las ideas cosmológicas actuales. Sin embargo, ¿qué papel desempeñó en el origen de éstas, cuando a principios del siglo XVII Galileo se valió de él para argüir contra el modelo geocéntrico y la visión aristotélica del cosmos?
- El telescopio primitivo sólo era un instrumento cualitativo. La imposibilidad de determinar paralajes estelares o la posibilidad de que las fases de Venus descubiertas por Galileo pudieran explicarse también con el modelo mixto de Brahe muestran que el telescopio no pudo zanjar rápidamente el debate entre los distintos modelos del universo.





2. EL COSMOS ARISTOTELICO, según una representación portuguesa de la segunda mitad del siglo XVI. Para cada una de las esferas celestes se dan tres medidas: los tiempos de su rotación, la amplitud de la esfera y la longitud del arco de un grado sobre la esfera, las dos últimas en leguas (una legua equivale a unos 6,2 kilómetros).

BARTOLOMEO VELHO, PRINCIPIO DE VERDADEIRO COSMOGRAPHICA..., 1568. PARIS BnF/SuW

miento de la teoría de Einstein al determinar, por medio de observaciones telescópicas precisas, que el campo gravitatorio del Sol desviaba la luz de estrellas.

La expansión del espacio llevó a pensar que hubo una fase primitiva y caliente del universo en la que radiación y materia se hallaban en equilibrio energético. Si la radiación característica de esa primitiva fase se había desplazado, debido a la expansión del universo, hacia la región del espectro electromagnético de longitudes de onda largas, deberíamos detectarla hoy como radiación de microondas. El desarrollo de los radiotelescopios, es decir, de la observación astronómica de la radiación electromagnética de longitud de onda mayor que la de la luz, llevó al descubrimiento casual en 1965 de esa radiación de fondo. Los descubridores, Penzias y Wilson, no conocían la predicción de tal radiación de fondo; su punto de partida fue un ruido en los receptores.

La posterior medición sistemática de la radiación de fondo, que nos llega de todas las direcciones del cielo, es uniforme en alto grado. Este hallazgo representó un nuevo desafío a la teoría de la expansión del universo: semejante uniformidad requiere que haya habido, en algún momento, una interacción entre regiones del cosmos que, según el modelo estándar de la cosmología, no puede haber sucedido nunca. Una solución, la que más interés suscita, consiste en suponer que se produjo una fase "inflacionaria" en el universo muy primitivo, una expansión muy rápida cuando no tenía todavía 10^{-30} segundos de edad. Aunque no se puede explorar el universo primitivo con telescopios ópticos, de ondas de radio o de rayos X, ya que era impenetrable para la radiación electromagnética, la teoría de la inflación representa ahora un reto para futuros telescopios de ondas gravitatorias.

Todos estos ejemplos nos muestran que el telescopio, con sus diferentes desarrollos y extensiones, siempre ha supuesto un desafío para la cosmología y que la cosmología, recíprocamente, siempre ha sido un acicate para la creación de nuevos medios de observación. Sin el telescopio, hubiera sido impensable el paso histórico de un universo newtoniano, estático, a un universo relativista, dinámico.

¿Vale esto mismo para el paso del universo de Ptolomeo al de Copérnico? ¿Qué desafío representó el telescopio en la época de su invención para la cosmología de entonces? ¿Qué podía verse con un telescopio de comienzos del siglo XVII y qué enseñaba la observación, con el trasfondo que aportaba el saber de la época, acerca del cosmos como un todo? Para aproximarnos a una respuesta, veamos primero cuál era el estado de la cosmología antes de la invención del telescopio.

Cosmología sin telescopio: los sistemas de la antigüedad

La concepción dominante del cosmos en los días en que se inventó el telescopio era una mezcla de la cosmología de la física aristotélica con las construcciones matemáticas de Ptolomeo, enriquecidas a finales de la Edad Media y a principios de la Edad Moderna frecuentemente con misticismos platónicos y cristianos (*véase la figura 2*).

El recorrido diario del Sol, la Luna y las estrellas del este al oeste, las fases de la Luna que se repetían alrededor de cada 29 días, los movimientos anuales del Sol y de las estrellas

eran fenómenos periódicos que habían sido observados y registrados por muchas culturas de la Antigüedad. En ellos se fundaban los primeros calendarios de Babilonia, Egipto, China y América Central. Además, se observaban y predecían fenómenos regulares con períodos más largos, como los movimientos de los planetas y los eclipses de la Luna y el Sol; se encuentran predicciones así ya en textos cuneiformes astronómicos de los babilonios del primer milenio antes de Cristo. Pero ninguna de las culturas de la Antigüedad, con excepción de la antigua Grecia, había interpretado los movimientos celestes mediante complicados modelos geométricos y mecánicos. Y esa tradición cosmológica griega estuvo vigente hasta principios de la Edad Moderna.

El conocimiento de la forma esférica de la Tierra se atribuye a Pitágoras, en el siglo VI a.C. Entre las observaciones de las que se seguía esa esfericidad se contaban, entre otras, la visibilidad de diferentes estrellas desde distintas latitudes y la forma redonda de la sombra de la Tierra en los eclipses de Luna. Y aunque también había quienes, como Anaxágoras y más tarde Lucrecio, creían en una Tierra plana, la mayor parte de los intentos de explicar los movimientos celestes geométricamente coincidían en que la Tierra era esférica.

Entonces, la Tierra podía encontrarse en el centro del mundo, en cuyo caso se habla de una imagen geocéntrica del mundo. O podía trazar una órbita circular alrededor del centro del mundo; si el Sol ocupa ese centro, se habla de una imagen heliocéntrica del mundo. El movimiento de las estrellas en un día puede deberse a un movimiento de la Tierra o a un movimiento de las estrellas, fijadas a una cáscara esférica, en torno de la Tierra. Todas estas diferentes posibilidades se encuentran en unos u otros de los diferentes autores de la antigüedad griega.

Heráclito del Ponto, en el siglo IV a.C., supuso una rotación diaria de la Tierra, que se encontraba en el centro del cosmos, en torno a un eje fijado en los polos celestes. También se le atribuye una representación del cosmos en la que Mercurio y Venus describen órbitas circulares alrededor del Sol mientras éste circunda la Tierra. Según otra idea de Heráclito del Ponto, cada estrella representa un mundo propio, con una Tierra en el centro rodeada de aire y de la sustancia celeste, el éter.

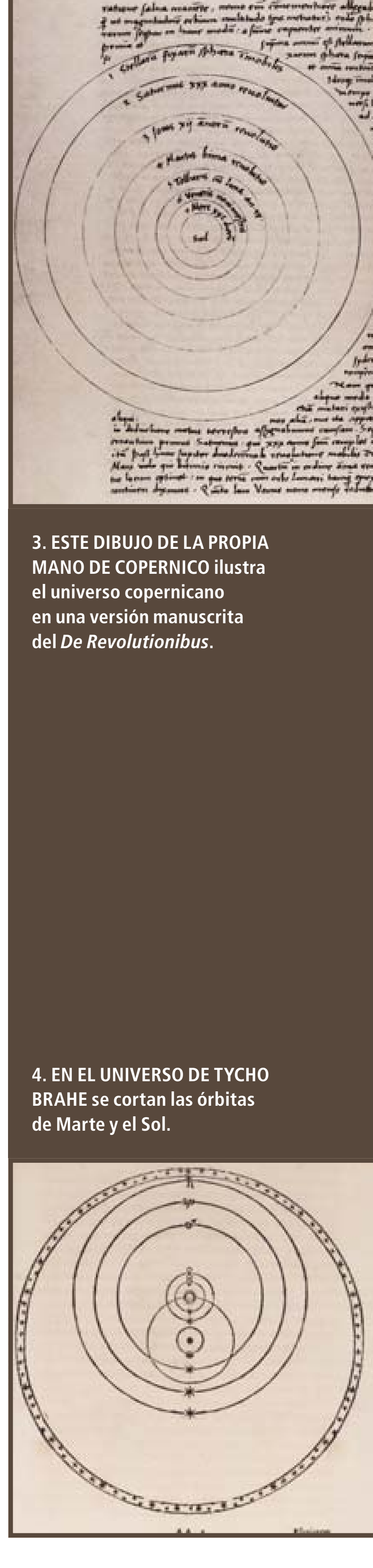
Esta idea de muchos mundos, que a comienzos de la Edad Moderna fue adoptada por Giordano Bruno (1548-1600), era frecuente en la Antigüedad, especialmente entre pensadores atomistas. A Aristarco de Samos (alrededor de 300 a.C.) se le atribuye la tesis de que la Tierra no sólo gira alrededor de su propio eje en 24 horas, sino que, además, describe un movimiento anual en torno al Sol. Platón, por el contrario, supuso a la Tierra en reposo y dejó que la esfera de las estrellas fijas girara alrededor de su eje una vez cada 24 horas.

Para aclarar los movimientos que el Sol, la Luna y los cinco planetas conocidos en la Antigüedad —Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno— realizan respecto a las estrellas fijas, se estableció un sistema de capas esféricas concéntricas en cuyo centro común estaba la Tierra en reposo. Cada esfera realizaba un movimiento en torno a su propio eje y los cuerpos celestes estaban fijos en el ecuador de la esfera que correspondiese a cada uno. Eudoxo de Cnido (ca. 408-355 a.C.), con cuyo nombre se asocia la primera elaboración de tal sistema de esferas homocéntricas, concibió 27 esferas: una para las estrellas fijas, tres para el Sol y la Luna, y cuatro para cada uno de los cinco planetas (los ejes de esas esferas estaban inclinados unos con respecto a los otros). Aristóteles (384-322 a.C.) supuso una interacción mecánica de las esferas, que se impulsaban mutuamente; necesitó 55 esferas completas, que, en parte, sólo se incluían para compensar movimientos de esferas exteriores a ellas.

Los complicados movimientos en forma de lazos de los planetas se podían describir, más sencilla y exactamente que con las esferas homocéntricas, con la teoría de los epiciclos, desarrollada con precisión cada vez mayor por Hiparco (alrededor de 140-129 a.C.) y Ptolomeo (alrededor de 127-150 a.C.). Según esta teoría, un planeta se mueve uniformemente en una órbita circular, el epiciclo, cuyo punto central se mueve, a su vez, en una órbita alrededor de la Tierra, el deferente.

Más epiciclos se pueden añadir para una descripción refinada de los movimientos. Ptolomeo combinó la idea del movimiento en epiciclos con la de un deferente excéntrico. El punto central del deferente está entonces a medio camino entre el punto central de la Tierra y del ecuante, un punto respecto al cual el movimiento sobre el deferente resulta uniforme. Con esto Ptolomeo había abandonado de hecho una idea fundamental, el movimiento circular uniforme, pero había dejado para sus "partidarios acérrimos", como escribía el astrónomo Rudolf Wolf en 1890 en su manual de astronomía, un asilo en el ecuante, "y poder morir allí tranquilamente".

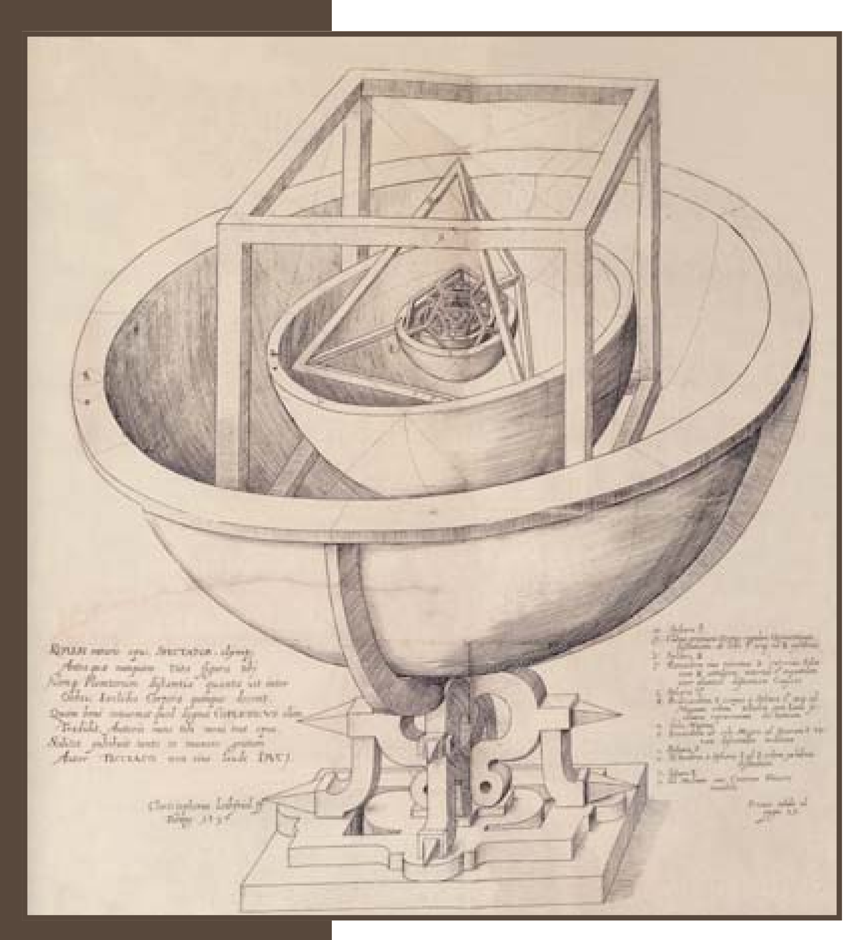
La teoría de los epiciclos se fusionó pronto con la enseñanza aristotélica de las esferas homocéntricas cristalinas. Se creó así un esquema del mundo; del esbozo se seguían en particular un patrón de distancias de los cuerpos celestes a la Tierra. La idea fundamental de esas



3. ESTE DIBUJO DE LA PROPIA MANO DE COPERNICO ilustra el universo copernicano en una versión manuscrita del *De Revolutionibus*.

4. EN EL UNIVERSO DE TYCHO BRAHE se cortan las órbitas de Marte y el Sol.

CRACOVIA, BIBLIOTHECAE UNIVERSITATIS IAGELLONICAE/SuW (*arriba*); TYCH BRAHE, *De mundi...*, VICENZA, BIBLIOTECA DI BABELE (*abajo*)



5. SEGUN KEPLER, las distancias entre las esferas de los planetas se pueden calcular disponiendo los cinco cuerpos platónicos unos dentro de otros.

JOHANNES KEPLER, MYSTERIUM COSMOGRAPHICUM, DE 1596 (VICENZA, BIBLIOTECA DI BABELE)/SuW

distancias cosmológicas tiene su origen en el mismo Ptolomeo.

En primer lugar había que fijar un orden de distancias de los cuerpos celestes a la Tierra. Se suponía que la Luna era el cuerpo celeste más próximo. Las observaciones de eclipses de otros cuerpos celestes, como el Sol, los planetas o las estrellas fijas, hacían obvia tal suposición. Era también el único cuerpo celeste que tenía una paralaje mensurable. Para la ordenación del Sol y los planetas interiores no existía ninguna base, pero se suponía desde Ptolomeo que Mercurio, Venus y el Sol, en este orden, se encontraban a distancias crecientes.

Los planetas exteriores se ordenaban por su velocidad decreciente respecto a las estrellas fijas, de manera que Marte, Júpiter y Saturno se encuentran a distancias crecientes de la Tierra. Las distancias a los planetas se averiguaban entonces con la suposición aristotélica de que no existe el vacío: las esferas habían de disponerse muy juntas entre sí. De esta manera, la mayor distancia de la Luna tenía que ser igual a la menor distancia de Mercurio, la mayor distancia de Mercurio igual a la menor de Venus, y así sucesivamente. Finalmente, la esfera de Saturno tocaba directamente la de las estrellas fijas.

Para convertir las distancias relativas en absolutas bastaba, pues, medir una sola distancia. Antes de la invención del telescopio, la Luna era el único cuerpo celeste cuya paralaje podía averiguarse. Para pasar de la distancia Tierra-Luna a la distancia Tierra-Sol se utilizaban métodos geométricos, pero conducían a un valor veinte veces menor que el moderno. Todas las demás distancias se obtenían del esquema de distancias relativas. La distancia a la esfera de las estrellas fijas era aproximadamente de 20.000 radios terrestres.

El sistema del mundo aristotélico-ptolemaico fue ampliado y refinado en la Edad Media árabe y latina, pero en lo esencial mantuvo su validez indiscutida hasta comienzos de la Edad Moderna. Sería, con todo, falso querer aclarar la larga vida de la imagen geocéntrica del mundo con la referencia a un dogmatismo eclesiástico o a una supuesta falta de pensamiento libre. La visión geocéntrica estaba incrustada en un entramado conceptual, y no era fácil que una idea aislada, como la de que el Sol ocupaba una posición central, llevase a prescindir de todo el sistema. Las exactas predicciones de la astronomía geométrica ptolemaica apoyaban la visión geocéntrica del mundo. La imagen heliocéntrica del mundo de Aristarco nunca llegó a tal grado de elaboración. La visión geocéntrica del mundo estaba, además, estrechamente ligada a la filosofía aristotélica de la naturaleza, y ésta a su vez derivaba su fuerza persuasiva no sólo de la preponderancia de una tradición teórica, sino también de que reflejara aspectos de un saber "intuitivo" que se iba forjando en todo individuo mientras maduraba y que daban una gran credibilidad a muchos principios de esa filosofía.

Cosmología sin telescopio: problemas de la Edad Moderna

Copérnico intentó en su obra *De Revolutionibus* (1543), donde presentaba un sistema heliocéntrico (*véase la figura 3*) que no era inferior en su grado de elaboración al sistema ptolemaico, conservar casi todo lo del sistema aristotélico-ptolemaico: mantenía las órbitas circulares junto con ciertos epiciclos, y también las esferas cristalinas, que ahora ya no se tocaban, puesto que en su sistema todas las distancias relativas del sistema solar estaban fijadas por la geometría de las órbitas. El sistema copernicano no ofrecía ninguna mejora esencial en el cálculo de las posiciones de los planetas; sí implicaba consecuencias muy problemáticas. Así, no era evidente, según lo que pensaban sus contemporáneos acerca del movimiento, que la Tierra pudiera moverse tan deprisa por el espacio sin que los seres humanos lo notaran. Y junto a esta dificultad mecánica había una objeción astronómica: el movimiento anual de la Tierra alrededor del Sol debía originar una

paralaje anual de las estrellas fijas, ¡paralaje que nadie había observado!

¿Cómo solucionar este problema? La solución sólo podía estar en la suposición de una distancia muy grande de las estrellas fijas al Sol. Tycho Brahe —que, en vísperas de la invención del telescopio, había conducido el arte de la observación astronómica a un nuevo culmen—, consiguió una exactitud en las observaciones que le posibilitó fijar diferencias de pocos segundos de arco. Ya que él no había observado ninguna paralaje en las estrellas fijas, concluyó que la esfera de las estrellas fijas —si la imagen heliocéntrica del mundo fuera verdad— debería estar unas 700 veces más lejos del Sol que la esfera de Saturno, es decir, más de siete millones de radios terrestres.

Puesto que Tycho, lo mismo que sus coetáneos y una tradición astronómica de más de mil años, suponía que podía determinar el diámetro angular de las estrellas fijas, y como, de acuerdo con sus medidas, las estrellas tenían un diámetro de aproximadamente un segundo de arco, la gran distancia a las estrellas fijas llevaba a la conclusión de que eran tan grandes al menos como la órbita terrestre alrededor del Sol. Esa dimensión le pareció absurda.

Introdujo un sistema del mundo entre el ptolemaico y el copernicano (*figura 4*), en el que adoptó la simplificación de Copérnico de la descripción del movimiento de los planetas (los planetas giran en torno al Sol), mientras eliminaba las dificultades inherentes al movimiento de la Tierra (la Tierra permanecía inmóvil mientras el Sol giraba a su alrededor junto con los planetas). Una consecuencia inevitable del sistema de Tycho era la destrucción de las esferas cristalinas, pues en ese sistema se cortaban las órbitas del Sol y Marte. Con todo, disfrutó de una gran popularidad a lo largo de todo el siglo XVII.

El sistema copernicano alcanzó la categoría de contraproyecto de la concepción eclesiástico-feudal del mundo y encontró en toda Europa partidarios, como Simon Stevin (1548-1620) en Holanda; en Alemania, Johannes Kepler (1571-1630) y Thomas Digges (1546-1595) en Inglaterra. Este último formuló en 1576 la idea de que la esfera de las estrellas fijas se extendía sin fin en el espacio, repleta de estrellas a las que, en su mayoría, debido a su gran distancia, no vemos en absoluto. La idea de un cosmos infinito se había hecho posible, ya que la esfera de las estrellas fijas no precisaba girar una vez en 24 horas alrededor de un eje.

El fin de Kepler era sondear el plan divino del sistema del mundo. En su *Mysterium cosmographicum* (1596) presentó una exposición de argumentos geométricos que justificaban que hubiera seis planetas y las distancias entre sus esferas en el sistema copernicano. Partiendo de que sólo existen cinco cuerpos regulares, los sólidos platónicos (tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro), situaba a cada uno entre dos esferas planetarias, rodeado por la exterior y rodeando a la interior, de manera que las distancias resultantes entre las esferas coincidían bastante bien con las distancias relativas obtenidas de las mediciones.

Kepler colocó al Sol en el centro de fuerzas del sistema planetario; con su rotación impulsaba a los planetas mediante una especie de fuerza magnética, a los más cercanos más deprisa y a los más lejanos más despacio. En su intento de calcular la órbita de Marte según Copérnico a partir de los datos de Tycho Brahe, llegó a establecer la forma elíptica de las órbitas planetarias, un descubrimiento que presentó en su *Astronomia Nova* en 1609. Fue un golpe de suerte histórico que Tycho le diera los datos de Marte, pues las pequeñas excentricidades de las órbitas de los demás planetas exteriores no hubieran sido suficientes para poner de relieve la insuficiencia de la astronomía basada en órbitas circulares. Dicho de otra manera: si la órbita de Marte hubiera sido tan poco excéntrica como la de los otros planetas conocidos (con la excepción de Mercurio, cuya observación era difícil), entonces la forma elíptica de las órbitas planetarias se hubiera descubierto después de inventado el telescopio.

La invención del telescopio, ¿la ruptura decisiva?

La primera exposición de Galileo de sus propias observaciones telescópicas, el *Sidereus Nuncius*, apareció de inmediato. La impresión del librito en marzo de 1610 se hizo sólo pocos días después de su última observación. Mientras Galileo retuvo durante décadas algunos de sus descubrimientos, como la forma parabólica de la trayectoria de los cuerpos pesados, en este caso trabajó en la publicación antes incluso de haber terminado las observaciones. La situación personal de Galileo debió de influir en las prisas. Dedicó la obra al gran duque de Toscana, Cósimo de Médicis II, en cuyo honor llamó "lunas mediceas" a los cuatro satélites de Júpiter que había descubierto, hoy "lunas galileanas". La publicación de su obra le ayudó también a su colocación como matemático y filósofo en la corte florentina de los Médicis.

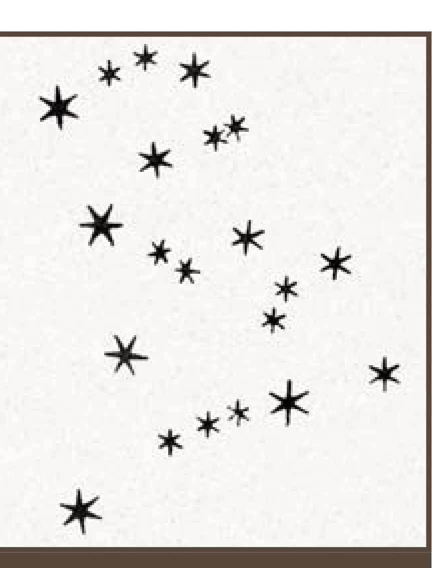
Está claro que las urgencias le venían del afán por verse reconocida su prioridad en los descubrimientos. Galileo "reinventó" el telescopio, como él mismo escribió, en la primavera de 1609. Se habían construido ya por toda Europa telescopios, y hasta se los había dirigido alguna vez al cielo. Un boletín holandés de octubre de 1608 decía del nuevo instrumento



6. DIBUJO A TINTA CHINA de las fases lunares por Galileo, de 1610.

La revolución cosmológica del Renacimiento utilizó modelos geométricos celestes de la antigüedad clásica.

GALILEI, *SIDEREUS NUNCIUS* PAG. 10v/BARBARA HERRENKIND/*SuW*



7. ASI DIBUJO GALILEO en el *Sidereus Nuncius*, basándose en sus primeras observaciones telescópicas de la Vía Láctea, la estructura hasta entonces conocida como "nebulosa de la cabeza de Orión": la resolvió en 21 estrellas diferentes.

Los bocetos lunares de Galileo indujeron a Kepler a especular sobre posibles habitantes de la Luna.

que, junto a su utilidad en asuntos militares, valdría para ver estrellas que a simple vista se ocultaban por ser muy pequeñas. Y en julio de 1609, unos meses antes que Galileo, Thomas Harriot dirigió en Inglaterra hacia la Luna su telescopio y nos dejaba el primer registro de una observación telescópica.

También Kepler se había ocupado algunos años antes del efecto amplificador de las lentes y espejos, pero llegó a la conclusión de que el aire, que supuso denso y de color azulado, e incluso la "propia sustancia celeste", ocultaría y difuminaría los detalles de objetos lejanos. Después de haber oído sobre el telescopio de Galileo, reconoció que sus anteriores reflexiones eran falsas y admitió que el éter, la "sustancia celeste", era mucho menos densa que el aire; aceptó incluso que había mucha más materia en la lente óptica que a lo largo del inconmensurable camino de la luz a través del espacio, puesto que la lente producía un oscurecimiento, pero el éter no. Concluyó de esto que debía considerarse que el espacio entre la Tierra y los cuerpos celestes estaba casi vacío.

A continuación, Kepler consiguió aclarar el funcionamiento del telescopio galileano, que consta de una lente objetivo convexa y una lente ocular cóncava. A lo cual añadió la ideación del llamado telescopio astronómico o de Kepler, compuesto de dos lentes convexas. La invención del telescopio, ese instrumento sin el que no se puede comprender la astronomía de la Edad Moderna, no pende, por tanto, de los débiles hilos históricos de la biografía de un solo hombre.

Galileo y Kepler: intérpretes de las primeras observaciones telescópicas

Ya a mediados de marzo de 1610 recibió Kepler la noticia, a través de un amigo, de que Galileo había descubierto con su telescopio cuatro nuevos planetas. Su principal preocupación fue cómo podía ser verdad esto sin que cuestionara su *Mysterium cosmographicum*, en donde el número de seis planetas estaba fundamentado en la existencia de exactamente cinco cuerpos platónicos, de manera que cada planeta de más ponía en peligro ese fundamento. Antes de ver Kepler el *Sidereus Nuncius*, se tranquilizaba con la idea de que a cada planeta le correspondiese una sola luna y que Galileo debía de haber descubierto las correspondientes a Saturno, Júpiter, Marte y Venus, mientras que la de Mercurio, en razón de su proximidad al Sol, todavía no la había descubierto.

El 8 de abril recibió Kepler el escrito de Galileo con el ruego de que expresara su opinión. Cuando once días después el correo volvió a Italia, llevaba la respuesta de Kepler a Galileo, que en mayo sería publicada con el título *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* ("Conversación con el mensajero de las estrellas").

El *Sidereus Nuncius* de Galileo y la *Dissertatio* de Kepler son dos escritos que apenas podrían expresar con mayor claridad la diferente actitud de los dos científicos. Los dos interpretaban los nuevos descubrimientos como indicios del sistema copernicano del universo, pero mientras que en Galileo casi parecía que las cosas sobre las que informaba no sólo las había visto él primero, sino que también las había pensado primero, el escrito de Kepler transmitía la idea de que los descubrimientos de Galileo eran una contribución, esencial, a un vasto debate que en parte provenía de la Antigüedad. "Por eso, mi querido Galileo", escribe Kepler, "no necesitas envidiar la fama que merecen nuestros predecesores en este punto, que ya habían predicho mucho antes que así debía ser lo que tú ahora aseguras haber visto con tus propios ojos. También a ti, no obstante, te corresponde gloria suficiente [...]".

El mismo Kepler había contribuido no poco al debate, lo que puede aclarar por qué no dudó en considerar los descubrimientos de Galileo dignos de crédito mucho antes de que él mismo tuviera la oportunidad de comprobarlos con un telescopio propio. Para ello hubo de esperar todavía hasta agosto. Galileo regaló varios de sus telescopios a diversas personalidades. A Kepler no le dio ninguno; ¿tal vez porque Galileo lo consideraba un competidor?

Más tarde, cuando Kepler poseía ya un telescopio, le comunicaba Galileo sus últimos descubrimientos codificados en anagramas, un método habitual en aquella época cuando se quería establecer la prioridad de un descubrimiento, pero sin exponerse demasiado pronto.

¿Cuáles fueron los primeros descubrimientos de Galileo con el telescopio? ¿Qué importancia tenían para la cosmología? ¿Y qué significaban a los ojos de Kepler?

La Luna como la Tierra

Lo mismo que Harriot en Inglaterra, en Italia apuntó Galileo su nuevo instrumento hacia la Luna, el único cuerpo celeste (junto al Sol quizá) sobre el que se podían reconocer estructuras a simple vista. De la forma y variación temporal de las sombras en el límite iluminado de la Luna en cuarto creciente (*véase la figura 6*), Galileo dedujo la presencia de montañas y valles en la Luna, y calculó que las montañas de allí eran varias veces más altas que las de aquí. Revivió la especulación, procedente de la Antigüedad, de que las regiones oscuras de la superficie lunar eran mares, y pensó que podría confirmarlo con nuevas observaciones. Utilizó la suposición de una atmósfera lunar

GALILEI, *SIDEREUS NUNCIUS* /SuW

(que sería desmentida a principios del siglo xx) para explicar que el borde lunar no apareciese dentado a pesar de las montañas. Finalmente, explicó el tenue resplandor de la luna nueva como un reflejo de la luz procedente de la Tierra, semejante a la iluminación lunar de las noches terrestres (una explicación que el profesor de Kepler, Michael Mästlin, ya había dado veinte años antes).

Toda la descripción de las observaciones lunares por Galileo destaca la semejanza de la Luna con la Tierra. La finalidad es clara: la semejanza de la Tierra con la Luna contradice la visión aristotélica tradicional de la diferencia fundamental entre la esfera celeste y la terrestre. Una distinción de este tipo en el sistema copernicano, en el que la Tierra misma se había convertido en planeta, dejaba de tener sentido.

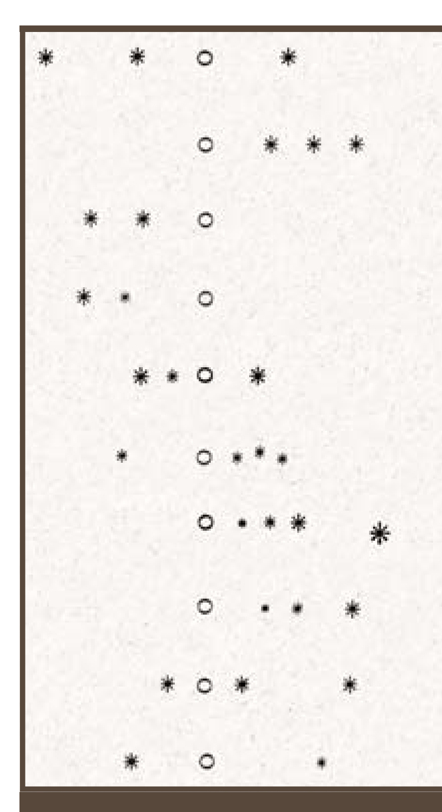
Junto a la idea de que en la Luna simplemente se reflejaban los continentes y mares de la Tierra, asemejar la Luna con la Tierra era, ya en la Antigüedad, una idea corriente. La interpretación de las manchas oscuras sobre la superficie lunar como mares se encuentra ya en Plutarco. Kepler, en cambio, había argumentado que las regiones claras sobre la superficie lunar eran agua y las oscuras, campo. Galileo le convenció con sus observaciones de lo contrario. Kepler también había escrito sobre la atmósfera de la Luna. Su profesor Mästlin, que había resaltado igualmente la semejanza entre la Luna y la Tierra, había llegado a declarar que sobre la Luna había visto algo así como grandes extensiones de nubes de lluvia.

Las estructuras redondas que Galileo había distinguido en las regiones claras de la superficie lunar indujeron a Kepler a especular sobre la posible estructura porosa de la materia lunar, que comparó con la piedra pómez. Una pequeña densidad del material lunar concordaba bien con su idea dinámica del movimiento de la Luna, que explicaba de modo análogo a como hacía con el movimiento de los planetas alrededor del Sol: la Tierra giraba y arrastraba a la Luna con una fuerza magnética. De esto, ya que la Luna se mueve en su órbita muy deprisa (el doble de célere que las partes externas de la Tierra en el ecuador), concluyó Kepler que no podía oponerse al tirón de la Tierra y que, por tanto, debía de ser muy ligera.

Kepler proyectaba la imagen de la Luna con ayuda de una cámara estenopeica (sin lente y de apertura pequeña) sobre una pantalla. Por medio de diferentes fenómenos observables en el borde de la sombra en la imagen de la Luna y del aspecto del oscurecimiento en los eclipses lunares había deducido que, en la Luna, había montañas mayores que en la Tierra, al menos si el tamaño de las montañas se comparaba con el cuerpo de la Luna o de la Tierra. De aquí había deducido que los habitantes de la Luna, si los había, serían más corpulentos y más rudos que los de la Tierra.

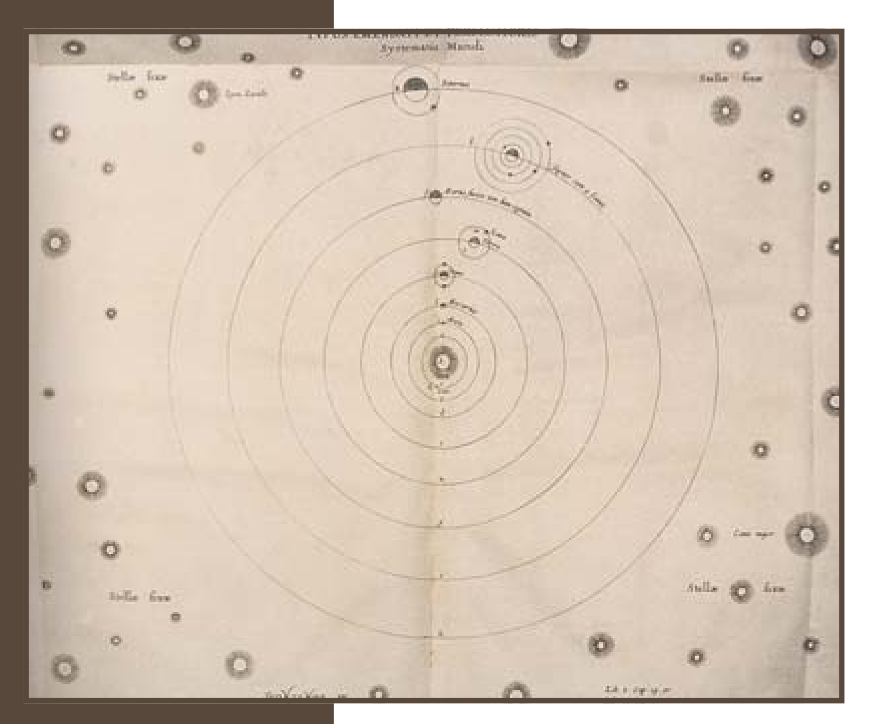
Los dibujos de la Luna en el *Sidereus Nuncius*, en los que Galileo colocaba exactamente sobre el borde de la sombra un cráter redondo, que en ese lugar y de ese tamaño no existe en absoluto, inspiraron a Kepler ulteriores especulaciones sobre los habitantes de la Luna. Imaginó que ese gigantesco cráter no era un fenómeno natural, sino que se trataba de una construcción hecha por seres inteligentes: “Pues sería muy creíble que, si sobre la Luna hubiera seres vivos..., se adaptaran a las características de su espacio, que tiene montañas mucho más altas y valles mucho más profundos que nuestra Tierra, y, con un peso corporal tan grande, produjeran obras gigantescas. Puesto que tienen un día cuya duración es igual a la de quince terrestres y han de experimentar un calor insoportable, y como quizá tampoco haya piedras para levantar un muro de protección contra el Sol, pero quizá sí dispongan de tierra arcillosa, que se compacte, su forma usual de edificar podría consistir en disponer gigantescas planicies hundidas sacando tierra de un círculo y amontonándola anularmente alrededor, quizá también con la intención de encontrar agua en lo más profundo. De esta manera podrían permanecer a la sombra y sobre el suelo hondo deambular tras las murallas de tierra amontonada siguiendo la sombra creada al girar el Sol. Podría haber una especie de ciudad subterránea: las casas serían numerosas cuevas excavadas en aquella base circular, con la tierra de labor y los campos de pastoreo en el medio para que no tuvieran que alejarse demasiado de sus posesiones en su huida del Sol”.

En resumidas cuentas, las observaciones de la Luna no podían aportar demasiado a la cosmología. El que una Luna parecida a la Tierra diera vueltas en torno de ésta, en el mejor de los casos se podría entender como una alegoría del posible recorrido de la Tierra alrededor del Sol. La separación de las esferas terrestre y celeste nunca había sido absoluta, como ponen de manifiesto los propios esfuerzos de Aristóteles por describir el movimiento de la esfera celeste mecánicamente. Por otra parte, las observaciones de Tycho Brahe anteriores al telescopio ya habían puesto en entredicho la inmutabilidad de la esfera celeste. Mientras Aristóteles había aceptado que los fenómenos celestes que parecían irregulares, los cometas por ejemplo, sucedían por debajo de la esfera de la Luna, Tycho argumentaba con sus mediciones de la paralaje que los cometas estaban al menos seis veces más lejos de la Tierra que la Luna.



8. EN LAS NOCHES DEL 8 AL 17 DE ENERO DE 1609, Galileo anotó estas constelaciones de Júpiter y sus lunas observadas telescópicamente, para su publicación en el *Sidereus Nuncius*. Los tiempos exactos de cada una de esas observaciones pueden obtenerse fácilmente con un programa de un planetario; la coincidencia con los datos de Galileo es muy grande.

GALILEI, *SIDEREUS NUNCIUS* (*ilustración*); *SuW* (*edición*)



9. ESTA REPRESENTACION DEL COSMOS procede de los *Experimenta nova*... de Otto von Guerike, de 1672, medio siglo después de la invención del telescopio. El sistema solar copernicano, junto con las lunas de Júpiter descubiertas telescópicamente, aparece inmerso en un mar de estrellas. Aunque ya no se distribuyen en una capa, su verdadera naturaleza era desconocida en esa época.

VICENZA, BIBLIOTECA DI BABELE/*SuW*

Innumerables estrellas

Galileo empieza la descripción de sus observaciones de estrellas señalando que, al mirarlas a través del telescopio, no aparecían tan aumentadas como la Luna. A los planetas se los veía constituidos en pequeños discos redondos, a la manera de pequeñas lunas, mientras que las estrellas no mostraban una forma bien dibujada. Galileo dice que hay una infinidad de estrellas que no se pueden ver sin el telescopio: dentro de los límites de uno a dos grados alrededor de una estrella conocida ve con su telescopio unas quinientas estrellas más. Con su telescopio resuelve la Vía Láctea en una colección de un sinfín de estrellas. Observa también que ciertas supuestas nebulosas, así la estrella de la cabeza de Orión de la que Copérnico decía que era "brumosa", son una aglomeración de muchas estrellas (*figura 7*).

El aspecto dispar de planetas y estrellas fijas lo interpreta Kepler del modo siguiente: los planetas sólo reflejan luz externa, como la Luna o la Tierra, mientras que las estrellas brillan desde su interior, es decir, son soles lejanos, como decía también Giordano Bruno. Al mismo tiempo, Kepler rechaza la idea de Bruno de infinitos mundos y argumenta que el Sol y los planetas ocupan una posición especial en el cosmos. Desde ninguna otra estrella, opina, aparece el mundo como desde el Sol, ya que las estrellas fijas están mucho más cerca unas de otras que el Sol respecto de las estrellas. El telescopio había mostrado ahora que las estrellas se encuentran más densamente amontonadas de lo que a simple vista se podía suponer.

Aunque el telescopio permitía distinguir la apariencia de los planetas y de las estrellas, ni Galileo ni Kepler llegaron a la conclusión de que las estrellas fuesen fuentes puntuales para las que no tenía sentido determinar el diámetro. Se comprueba en otro argumento de Kepler contra la multiplicidad de mundos. Para Tycho, el diámetro de la mayoría de las estrellas era mayor que un minuto de arco; bastaría, pues, un millar de estrellas de ese tamaño para sobrepasar el tamaño del Sol, pero sin que llegaran a alcanzar su luminosidad, como delata la oscuridad de la noche. De ahí concluye Kepler que la luminosidad de las estrellas es mucho menor que la de nuestro Sol y, por tanto, no pueden representar centros de otros mundos.

La reacción de Kepler ante las observaciones de estrellas de Galileo muestra que no debe entenderse que la abundancia de las nuevas estrellas llevara a pensar en una esfera de estrellas fijas mucho más amplia, tal como Digges había supuesto. Por tanto, esas observaciones no desempeñaron un papel determinante en el debate sobre los sistemas del mundo.

Las lunas de Júpiter

Finalmente, Galileo informa en el *Sidereus Nuncius* de la observación de cuatro lunas de Júpiter, cuyo descubrimiento tiene por el asunto más importante del libro. Describe las constelaciones observadas (*figura 8*) entre el 7 de enero y el 2 de marzo de 1610 y concluye que las cuatro "estrellas" giran en torno a Júpiter. Más tarde, Harriot calculó los períodos de rotación de las lunas de Júpiter basándose en observaciones propias, realizadas en el invierno de 1610-1611. Galileo interpretó tal existencia de otros centros distintos de la Tierra alrededor de los cuales giraban cuerpos celestes como una indicación de la validez del sistema copernicano.

La noticia de las cuatro lunas de Júpiter dio a Kepler ocasión para esperar una mejor coincidencia entre las distancias calculadas y las observadas de los planetas. En su teoría de los cuerpos platónicos, ampliaba la esfera de Júpiter con la introducción de las lunas; así como las distancias relativas de los seis planetas venían determinadas por los cinco sólidos platónicos, podrían quizá, pensaba Kepler, describirse las distancias de las cuatro lunas de Júpiter con la ayuda de los tres cuerpos rómbicos.

Además, las nuevas lunas le hacían pensar a Kepler que ahora ya no era improbable que hubiera habitantes, no sólo en la Luna, sino en Júpiter. Pues, ¿para qué serviría el espectáculo de la salida y puesta de las cuatro lunas, si no había nadie allí para seguirlas con la vista? Esta consideración suscitaba un problema que para Kepler tenía mucho peso: "...si hay en

El autor

Matthias Schemmel dirige el grupo de investigación TOPOL de epistemología histórica del espacio de la Universidad Humboldt de Berlín y del Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia.

el cielo cuerpos semejantes a nuestra Tierra, ¿no entraremos entonces en conflicto con ellos acerca de cuál tendría el mejor puesto en el mundo? Pues si las esferas de los demás son de mayor categoría, entonces no seríamos nosotros los seres vivos racionales de más alto rango. ¿Cómo iba entonces a estar todo ahí por causa del hombre? ¿Cómo podríamos ser nosotros los señores de la obra de Dios?"

Kepler debe defender la posición prominente no sólo del Sol entre las estrellas fijas, sino también la de la Tierra entre los planetas. Para tal fin dice, entre otras cosas, que desde la Tierra se pueden ver todos los planetas —Mercurio es todavía perceptible a pesar de su proximidad al Sol—, lo que no es posible desde Júpiter. Por eso se les ha dado cuatro lunas como compensación a los habitantes de Júpiter, y exactamente cuatro, ya que hay cuatro planetas entre el Sol y Júpiter. Y tampoco la astrología ha de temer una revisión por los nuevos planetas descubiertos, pues éstos, creados para los habitantes de Júpiter, sólo pueden tener una influencia muy pequeña sobre la Tierra.

Según la visión actual, la importancia del descubrimiento de las lunas de Júpiter para la cosmología de la época consiste esencialmente en haber ofrecido la vista exterior de un "sistema planetario" en pequeño. Pero mientras las leyes de Kepler de las órbitas de los planetas y satélites se han convertido en una parte esencial del canon científico astronómico, sus especulaciones geométricas, astrológicas y teológicas parecen hoy meras curiosidades de la historia de la ciencia. En el proceso del desarrollo de la ciencia permanecen sólo aquellos aspectos de la contribución científica de un individuo que, alejándose de él, quedan asimilados en el saber compartido de muchos y, precisamente por eso, se transforman. Los restantes aspectos, aun cuando desempeñasen una función catalizadora importante en la formación del nuevo conocimiento, se irían quedando atrás y desde la posteridad sólo parecerían vías muertas.

El telescopio: de instrumento cualitativo a cuantitativo

En la propia *Dissertatio* deseaba Kepler tener el telescopio de Galileo para determinar de nuevo la distancia de la Tierra al Sol. Las observaciones de Harriot de las cuadraturas de la Luna quizá se lo propusieron. Según un método de Aristarco, que se había retomado a principios de la Edad Moderna, era posible, con mediciones exactas de la cuadratura y de la posición de la Luna, deducir la distancia de la Tierra al Sol a partir de la distancia de la Tierra a la Luna, ya que las rectas que unen la Tierra, la Luna y el Sol forman un ángulo recto en el momento de la cuadratura.

Pero este método presuponía una precisión de las medidas demasiado alta. La utilización del telescopio en la astronomía cuantitativa fue posible sólo a partir de la segunda mitad del siglo XVII, cuando se dispuso de telescopios keplerianos con mejores propiedades ópticas y que admitían que se pusiese una cruz de hilos o un micrómetro en el plano focal. Se intentó primero determinar, con los datos telescópicos de la paralaje, las dimensiones del sistema solar. Pero esta determinación se conseguiría de manera fiable sólo con ocasión de los tránsitos de Venus de 1761 y 1769.

En sus primeros tiempos, el telescopio fue sólo un instrumento cualitativo, que no podía aportar soluciones rápidas a los debates cosmológicos de la época. En cambio, sí enriqueció la polémica con nuevos fenómenos que reclamaban una explicación. Las manchas solares, por ejemplo. Observadas antes de la invención del telescopio, con el advenimiento de éste se convirtieron en objeto de controversia, pues un Sol en rotación con manchas contradecía la física aristotélica. La predicción de una conjunción superior de Venus para principios de diciembre de 1611 llamó la atención; ese fenómeno debía aparecer en el sistema ptolemaico como un tránsito de Venus delante del Sol y, según el sistema de Tycho o el de Copérnico, ciertamente no. Pero el asunto no podía zanjarse fácilmente, ya que se podían aducir diversas razones de que no se observara tal tránsito, empezando por las dudas sobre la corrección de su predicción.

Hacia finales del año 1610 Galileo descubrió que Venus tenía fases, lo mismo que la Luna. Un amigo le había indicado que el sistema copernicano, pero no el sistema ptolemaico, predecía fases de los planetas interiores. Kepler observó con acierto que las fases de Venus aparecerían también en el sistema de Tycho, de manera que no podían tomarse como prueba de un universo heliocéntrico. Lo que sí hubiera sido una prueba era la determinación de la paralaje de una estrella fija.

A principios del siglo XVIII, James Bradley pensó que había medido una, pero resultó que había descubierto un efecto distinto: la aberración de la luz, que, según interpretó correctamente, demostraba la revolución anual de la Tierra en torno al Sol. Hasta 1838 no conseguirían Bessel y otros las primeras pruebas fiables de paralajes de estrellas fijas. Para esas alturas la imagen de un universo heliocéntrico ya estaba firmemente establecida. El entramado conceptual en que antaño la visión geocéntrica estaba incorporada se había ido transformando paulatinamente: ahora portaba una nueva imagen del universo.

Bibliografía complementaria

SONNENFINSTERNISSE IN ASSYRIEN. S. M. Maul en *Sterne und Weltraum*, n.º 9, págs. 742-750; 2000.

GIORDANO BRUNO UND DIE KOSMOLOGIE DER UNENDLICHKEIT. J. Kirchhoff en *Sterne und Weltraum*, n.º 2, págs. 134-141; 2000.

SIDEREUS NUNCIUS. HERAUSGEGEBEN VON HANS BLUMENBERG, ÜBERSETZT VON MALTE HOSSENFELDER. G. Galilei. Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, n.º 337; Frankfurt am Main, 2002.

VON ANAXIMANDER BIS NEWTON. K. Reich en *Sterne und Weltraum* Special, n.º 2, Schöpfung ohne Ende, págs. 100-104; 2002.

VENUS VOR DER SONNE. M. J. Neumann en *Sterne und Weltraum*, n.º 6, págs. 22-32; 2004.

GALILEI, DER KÜNSTLER. H. Bredekamp en *Sterne und Weltraum*, n.º 12, págs. 36-41; 2007.

PERSPEKTIVEN ASTRONOMISCHER ENTDECKUNGEN. H.-W. Rix en *Sterne und Weltraum*, n.º 8, págs. 32-40; 2008.

Historias particulares

Carles Carboneras y Susana Requena

El marcaje de animales mediante técnicas de bajo impacto, como las anillas de lectura a distancia, ha abierto nuevas perspectivas en la ecología de las aves. Podemos ya tomar datos de los individuos y, gracias a la creciente capacidad de computación, estudiar las poblaciones y niveles de organización superiores. Ello nos permite plantear cuestiones del tipo: ¿Sobrevive mejor un determinado tipo de individuos que otros? ¿Qué decisiones toman los animales y a partir de qué información?

Para responderlas, se requieren series de datos recabadas a lo largo de 5 o 10 años, más incluso, con una cadencia como mínimo anual. Conforme adquirimos conocimientos sobre los individuos, ahondamos en el funcionamiento y la estructura de los grupos y, a través de ello, en la ecología de la especie.

Hallamos un ejemplo de este nuevo enfoque metodológico en el estudio de la gaviota cabecinegra *Larus melanocephalus*, un ave marina muy gregaria, que pesa unos 300 gramos. Desde principios de los años noventa del siglo pasado, es objeto de un extenso programa de marcaje en el que participan anilladores y observadores de una docena de países. Azul-A24 nació en Italia; con 19 años, ha batido el récord de longevidad en la especie. Verde-1J4 es francesa; en 2007 sufrió una grave lesión en el ala izquierda, de la que se recuperó en tres meses. Ambas pasan los inviernos en el litoral barcelonés y forman parte de un estudio iniciado hace 5 años sobre unos 600 individuos.



1. Las gaviotas cabecinegras (*Larus melanocephalus*) ocupan en invierno el litoral mediterráneo. Su hábitat original debió corresponder a prados halófilos, con vegetación tolerante a la sal y cercanos al mar.



2. Esta gaviota es muy gregaria. Tiende a ocupar, año tras año, las mismas zonas. Probablemente el conocimiento de los individuos de mayor edad ayuda al grupo a localizar las fuentes de alimento.

GABI MARTIN

3. El anillamiento consiste en colocar a cada individuo una marca que opera a modo de "matrícula": una anilla de color con un código alfanumérico que permite reconocer a cada individuo sin que sea necesario manipularlo de nuevo. Una vez registrada la numeración de la anilla, queda abierto el historial del individuo. Este tipo de marcaje no afecta a la supervivencia ni al comportamiento de las gaviotas.

GABI MARTIN

4. Azul-A24 (*derecha*) es la "abuela" italiana de las gaviotas cabecinegras que invernan en España; por su aspecto y tamaño, probablemente se trata de una hembra. A su lado, Negra-P8K (*izquierda*), posible macho anillado en 2000 en Ucrania como adulto reproductor; se observó de forma repetida hasta la primavera de 2007.

EL ORIGEN DE LA VIDA

ALONSO RICARDO Y JACK W. SZOSTAK

Nuevos datos aportan pistas sobre el modo en que surgieron los primeros seres vivos a partir de la materia inanimada

Todas las células, incluidas las bacterias más elementales, están repletas de dispositivos moleculares que serían la envidia de cualquier nanotecnólogo. A medida que oscilan, giran o se desplazan sin cesar por el interior de la célula, esas máquinas cortan, pegan y copian moléculas genéticas, transportan nutrientes de un sitio a otro o los convierten en energía, construyen y reparan las membranas celulares, y transmiten mensajes mecánicos, químicos o eléctricos. Una lista que crece con la incorporación incesante de nuevos descubrimientos.

Resulta prácticamente imposible imaginar el modo en que los mecanismos celulares, en su mayoría enzimas (catalizadores de naturaleza proteínica), pudieron formarse de manera espontánea cuando surgió la vida a partir de la materia inanimada hace unos 3700 millones de años. Es cierto que, dadas las condiciones adecuadas, algunos aminoácidos (los "ladrillos" con los que se construyen las proteínas) se forman fácilmente a partir de compuestos químicos más sencillos, tal y como descubrieron Stanley L. Miller y Harold C. Urey, de la Universidad de Chicago, en sus experimentos pioneros realizados en los años cincuenta. Pero pasar de ahí a la formación de proteínas y enzimas, eso ya es otra historia.

En el mecanismo celular para la fabricación de proteínas intervienen enzimas complejas que separan las hebras de la doble hélice de ADN para extraer la información que contienen los genes (las instrucciones para la construcción de las proteínas) y traducirla para obtener el producto final. Por tanto, explicar el origen de la vida conlleva una seria paradoja, pues hacen falta proteínas (así como la información almacenada en el ADN) para fabricar proteínas.

Por otra parte, la paradoja desaparecería si los primeros organismos no necesitasen las proteínas para nada. Experimentos recientes sugieren que podrían haberse formado espontáneamente moléculas genéticas semejantes al ADN o a su pariente cercano, el ARN. Y como esas moléculas pueden contorsionarse para adoptar distintas formas y operar a modo de catalizadores rudimentarios, quizás habrían logrado copiarse a sí mismas (para reproducirse) sin necesidad de proteínas.

Las formas de vida más primitivas podrían haber sido simples membranas compuestas de ácidos grasos (estructuras que también se forman de manera espontánea) en cuyo interior albergaban agua y esas moléculas genéticas autorreplicantes.

El material genético codificaría los rasgos que cada generación entregaba a la siguiente, tal y como hace en la actualidad el ADN en todos los organismos. Posteriormente, las mutaciones que surgían de forma aleatoria durante el proceso de copiado impulsarían la evolución, permitiendo que las células primitivas se adaptasen a su entorno para competir entre sí y, en última instancia,

CONCEPTOS BASICOS

- Se ha descubierto una vía que podría haberse seguido en la formación de ARN a partir de compuestos presentes en la Tierra primitiva.
- Otros estudios respaldan la hipótesis de que las células primitivas que contenían moléculas semejantes al ARN podrían haberse ensamblado espontáneamente para luego reproducirse y evolucionar hasta dar lugar a todas las formas de vida.
- Los científicos están intentando crear en el laboratorio organismos artificiales autorreplicantes. Semejante creación de vida permitiría comprender cómo surgió en el planeta.

HOLLY LINDEM (*fotoilustración*); GENE BURKHARDT (*diseño*)


A
U
G
C

convertirse en las formas de vida que hoy conocemos.

La naturaleza de los primeros organismos y las circunstancias exactas que dieron origen a la vida podrían estar perdidas para siempre para la ciencia. Pero la investigación puede, por lo menos, ayudarnos a comprender lo que es factible. El desafío final consiste en construir un organismo artificial que pueda reproducirse y evolucionar. Ciertamente, crear la vida ex novo nos ayudará a comprender cómo puede comenzar la vida, la probabilidad de que pueda existir en otros mundos y, en definitiva, qué es la vida.

Ingredientes básicos

Uno de los misterios más difíciles de resolver y más interesantes en torno al origen de la vida consiste en saber exactamente cómo se pudo haber formado el material genético a partir de moléculas más sencillas, presentes en la Tierra primitiva. A juzgar por las funciones que el ARN desempeña en las células modernas, parece probable que el ARN apareciese antes que el ADN. Cuando las células fabrican proteínas, primero copian los genes del ADN en ARN y luego utilizan el ARN a modo de plano para la síntesis de proteínas. Al principio, esta última etapa podría haber existido de forma independiente. Más adelante, el ADN habría surgido como una forma de almacenamiento más duradera, gracias a su mayor estabilidad química.

Los investigadores tienen otro motivo para suponer que el ARN surgió antes que el ADN. Las ribozimas (versión en forma de ARN de las enzimas) también desempeñan una función crucial en las células modernas. Las estructuras que traducen el ARN en proteínas corresponden a máquinas híbridas formadas por ARN y proteínas, y es el ARN el que realiza la función catalítica. Así, todas y cada una de nuestras células parecen albergar en sus ribosomas una "huella fósil" de un mundo primitivo dominado por el ARN.

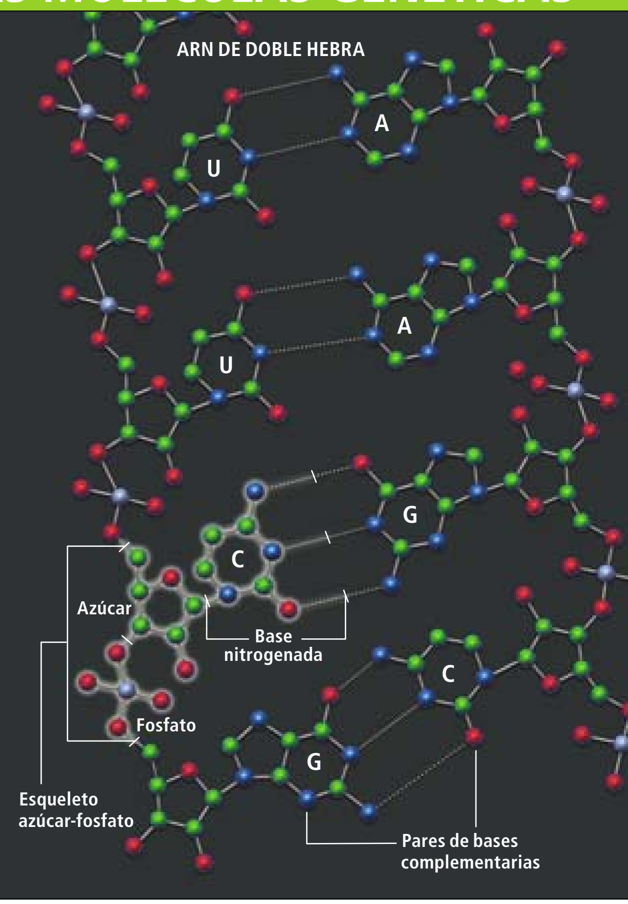
De ahí que numerosas investigaciones se hayan centrado en hallar un posible origen para el ARN. Las moléculas genéticas como el ADN y el ARN son polímeros (cadenas formadas por moléculas de menor tamaño), que se generan a partir de unos materiales de construcción denominados nucleótidos (monómeros). A su vez, los nucleótidos constan de tres componentes: un azúcar, un fosfato y una base nitrogenada. Hay cuatro tipos de bases nitrogenadas; constituyen el alfabeto mediante el cual el polímero almacena información. En un nucleótido de ADN la base nitrogenada puede ser adenina (A), guanina (G), citosina (C) o timina (T); en el alfabeto del ARN, la letra U (uracilo) sustituye a la T. Las bases nitrogenadas son compuestos ricos en nitrógeno que se unen entre sí según una regla sencilla: la A se empareja con la U (o con la T) y la G se empareja con la C.

Esos pares de bases forman los peldaños de la escalera de caracol del ADN (la famosa doble hélice); los emparejamientos exclusivos resultan cruciales para copiar fielmente la información y así una célula pueda reproducirse. El fosfato y las moléculas de azúcar constituyen el esqueleto de cada una de las hebras de ADN o de ARN.

Las bases nitrogenadas se ensamblan de forma espontánea, mediante una serie de etapas, a partir de cianuro, acetileno y agua (moléculas sencillas que estaban presentes en la mezcla primordial de sustancias químicas). Las moléculas de azúcar también se sintetizan fácilmente a partir de materiales de partida simples. Desde hace ya más de un siglo se sabe que al calentar una disolución alcalina de formaldehído (que también habría estado presente en una Tierra joven) se produce una mezcla que contiene un gran número de tipos de azúcar. El problema, sin embargo, consiste en obtener el tipo de azúcar "adecuado" para formar nucleótidos, que en el caso del ARN es la ribosa.

LAS PRIMERAS MOLECULAS GENETICAS

En la Tierra, las primeras entidades con capacidad de reproducirse y evolucionar probablemente portaban su información genética en alguna molécula semejante al ARN, un pariente cercano del ADN. El ADN y el ARN corresponden a cadenas de nucleótidos (*izquierda*). Una de las principales cuestiones consiste, pues, en averiguar cómo surgieron los nucleótidos a partir de compuestos químicos más sencillos. Cada uno de los tres componentes de un nucleótido (base nitrogenada, fosfato y azúcar) puede formarse de manera espontánea, pero difícilmente se enlazan entre sí de forma adecuada (*centro*). Sin embargo, ciertos experimentos recientes han demostrado que, al menos dos tipos de nucleótidos presentes en el ARN, los que contienen las bases nitrogenadas C (citosina) y U (uracilo), podrían haber surgido mediante una ruta distinta (*derecha*). (En los organismos modernos, las bases nitrogenadas del ARN son de cuatro tipos: A (adenina), C, G (guanina) y U, las letras que componen el alfabeto genético).



¿QUE ES LA VIDA?

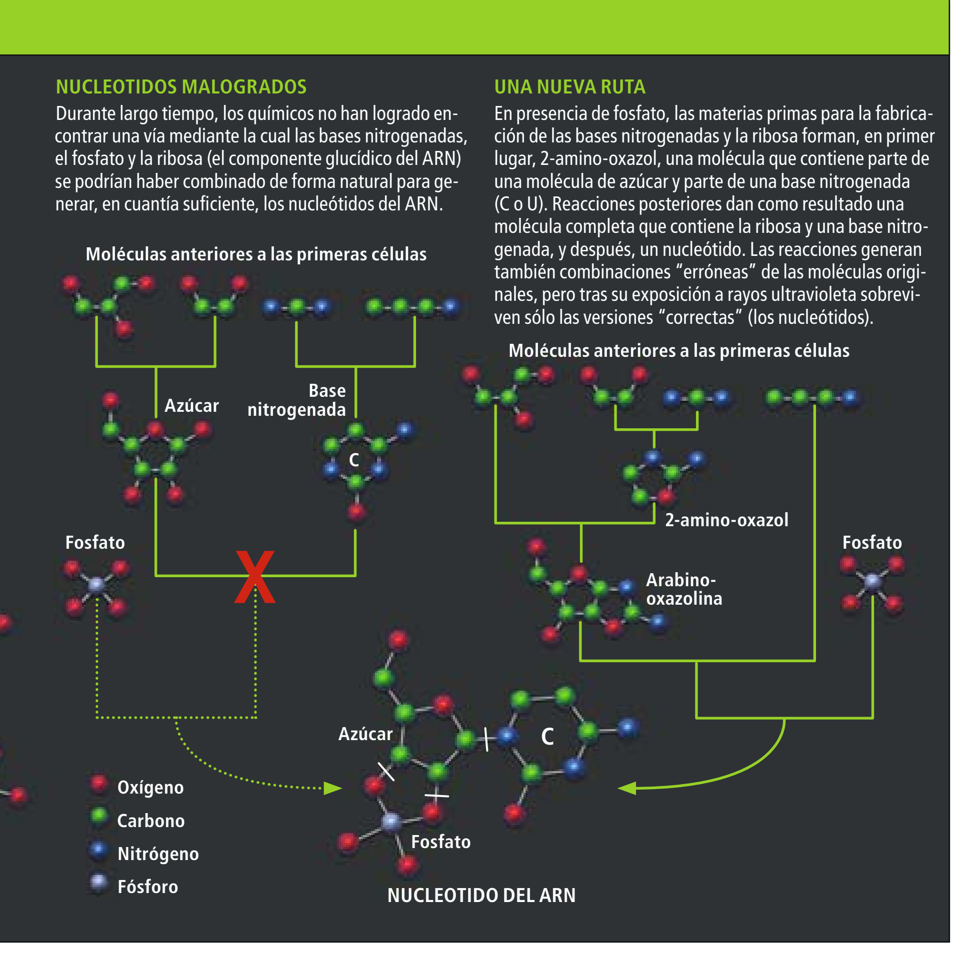
Durante largo tiempo, los científicos, para definir la "vida", recurrieron a conceptos de amplitud suficiente para que incluyeran formas aún no descubiertas. He aquí algunas de las múltiples definiciones propuestas.

1. **Erwing Schrödinger sugirió que una propiedad característica de los sistemas vivos era su capacidad para autoensamblarse, en contra de la tendencia natural hacia el desorden, o entropía.**

2. **La "definición funcional" de Gerald Joyce, adoptada por la NASA, establece que la vida corresponde a "un sistema químico autosostenible con capacidad para llevar a cabo una evolución darwinista".**

3. **Según la "definición cibernética" de Bernard Korzeniewski, la vida constituye un entramado de mecanismos de retroinhibición.**

ANDREW SWIFT; FUENTE: "SYNTHESIS OF ACTIVATED PYRIMIDINE RIBONUCLEOTIDES IN PREBIOTICALLY PLAUSIBLE CONDITIONS", POR MATTHEW W. POWNER, BEATRICE GERLAND Y JOHN D. SUTHERLAND, EN *NATURE*, VOL. 459; 14 DE MAYO DE 2009



La ribosa, junto con otros tres azúcares estrechamente relacionados, se forma a partir de la reacción de dos azúcares sencillos que contienen dos y tres átomos de carbono, respectivamente. Mas la capacidad de la ribosa para formarse de esa manera no resuelve el problema de cómo se convirtió en una molécula abundante en la Tierra primitiva, pues se da la circunstancia de que la ribosa es inestable y se descompone rápidamente, incluso en disoluciones moderadamente alcalinas. En el pasado, ello llevó a pensar que las primeras moléculas genéticas no podían haber contenido ribosa. Pero uno de los autores (Ricardo) y otros han descubierto formas mediante las cuales podría haberse estabilizado la ribosa.

El fosfato que forma parte de los nucleótidos plantea otro rompecabezas fascinante. El fósforo, elemento fundamental del grupo fosfato, abunda en la corteza terrestre; sobre todo, en minerales que no se disuelven con facilidad en agua, donde se supone que se originó la vida. No resulta obvio, por tanto, el modo en que podrían haberse incorporado los fosfatos a la mezcla prebiótica. Las elevadas temperaturas de las chimeneas volcánicas convierten los minerales que contienen fosfatos en formas solubles del fosfato, pero las cantidades liberadas, al menos en las proximidades de los volcanes modernos, son moderadas. Otra posible fuente de fósforo es la schreibersita, un mineral que abunda en ciertos meteoritos.

En 2005, Matthew Pasek y Dante Lauretta, de la Universidad de Arizona, descubrieron que la corrosión de la schreibersita en agua libera su componente fosforado. Esa ruta parece prometedora porque libera el fósforo en una forma que es más soluble en agua que el fosfato y que reacciona, de una manera más intensa, con compuestos orgánicos (basados en el carbono).

Cadena de montaje

Disponemos ya de un boceto, al menos, de las posibles rutas que dan lugar a las bases nitrogenadas, a los azúcares y al fosfato. El siguiente paso lógico consistiría en ensamblar dichos componentes en una estructura adecuada. Hablamos de la etapa que, en los últimos decenios, ha provocado las mayores frustraciones en la investigación de la química prebiótica.

La simple mezcla de los tres componentes en agua no conduce a la formación espontánea de un nucleótido; por la poderosa razón de que cada reacción de condensación implica la liberación de una molécula de agua, algo que no suele ocurrir de manera espontánea en una disolución acuosa.

Para que se formen los enlaces químicos necesarios hay que suministrar energía; por ejemplo, mediante la adición de compuestos ricos en energía que ayuden a que se produzca la reacción. En la Tierra primitiva podría haber existido un gran número de compuestos de ese tipo. En el laboratorio, sin embargo, las reacciones impulsadas por tales moléculas han mostrado ser poco eficaces en el mejor de los casos o, como ocurre la mayoría de las veces, completamente infructuosas.

La última primavera, para alborozo de quienes trabajan en este campo, John Sutherland y sus colaboradores, de la Universidad de Manchester, anunciaron que habían hallado una ruta más convincente mediante la cual podrían haberse formado los nucleótidos ; una vía que,

1. JOHN SUTHERLAND y sus colaboradores, de la Universidad de Manchester, resolvieron en mayo una vieja cuestión sobre la química prebiótica. Demostraron que los nucleótidos pueden formarse a partir de reacciones químicas espontáneas. Aparece en la foto inferior (*el segundo, empezando por la izquierda*) junto a miembros de su laboratorio.



LAURENT VILLERET

además, soslaya la cuestión de la inestabilidad de la ribosa.

Los investigadores mencionados abandonaron el sistema tradicional de intentar fabricar nucleótidos mediante la unión de una base nitrogenada, un azúcar y un fosfato. Basaron su estrategia en los mismos materiales de partida sencillos utilizados con anterioridad: derivados del cianuro, acetileno y formaldehído. Pero en lugar de formar la base nitrogenada y la ribosa por separado, para después tratar de unirlas, el equipo mezcló los ingredientes de partida, junto con el fosfato. Se produjo un complejo entramado de reacciones químicas (con el fosfato actuando a modo de catalizador en varias etapas de la ruta) que dio lugar a 2-amino-oxazol, una molécula de tamaño reducido, que consta de un fragmento de azúcar unido a un fragmento de base nitrogenada.

Esa molécula pequeña y estable se distingue por su carácter volátil. Quizá se formaran cantidades moderadas de 2-amino-oxazol junto a una mezcla de otros compuestos químicos en algún estanque de la Tierra primitiva; tras la evaporación del agua, el 2-amino-oxazol se vaporizó para condensarse en algún otro lugar, en forma pura. Una vez allí, se acumularía para convertirse en un reservorio de material, listo para posteriores reacciones químicas que darían lugar a la formación de un azúcar y una base nitrogenada, unidos entre sí.

Otro aspecto importante y gratificante de esa cadena de reacciones es que algunos de los productos secundarios generados en las primeras etapas facilitan las transformaciones que tienen lugar en fases más avanzadas del proceso. Aunque se trata de una ruta elegante, no genera sólo los nucleótidos “correctos”: en algunos casos, el azúcar y la base nitrogenada no se unen con la disposición espacial adecuada. Pero, sorprendentemente, la exposición a la luz ultravioleta —rayos UV solares intensos incidían sobre las aguas someras en la Tierra primitiva— destruye los nucleótidos “incorrectos”, dejando únicamente los “correctos”. El resultado final consiste en una ruta extraordinariamente limpia para la síntesis de los nucleótidos C y U.

Por supuesto, todavía necesitamos una ruta para la síntesis de G y A. Quedan, en efecto, retos pendientes. Pero el trabajo del equipo de Sutherland constituye un gran avance para poder explicar el modo en que una molécula tan compleja como el ARN pudo haberse formado en la Tierra primitiva.

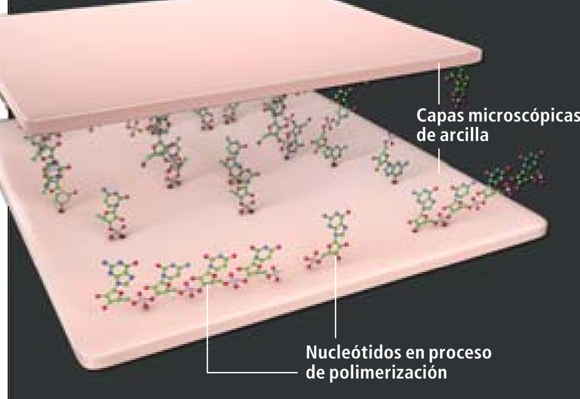
El recipiente: cálido y circunscrito

Disponemos de nucleótidos. La etapa final para la formación de una molécula de ARN estribará en la polimerización: el azúcar de un nucleótido forma un enlace químico con el fosfato del siguiente, de modo que los nucleótidos se van enlazando entre sí para crear una cadena. De nuevo, los enlaces no se forman espontáneamente en agua, sino que necesitan una fuente externa de energía. Mediante la adición de diversos compuestos químicos a una disolución de las versiones químicamente reactivas de los nucleótidos, los investigadores han producido cadenas cortas de ARN, dos de ellas con una longitud de 40 nucleótidos. A finales de los años noventa, Jim Ferris y sus colaboradores, del Instituto Politécnico Rensselaer, demostraron que los minerales de arcilla potenciaban el proceso: producían cadenas con una longitud de hasta 50 nucleótidos. (Hoy en día, un gen típico tiene una longitud de miles o millones de nucleótidos.) La capacidad intrínseca del mineral para unirse a los nucleótidos aproxima las moléculas reactivas, con lo que facilita la formación consiguiente de enlaces entre ellas.

Ese hallazgo reforzó la hipótesis de algunos investigadores sobre la posibilidad de que la vida hubiera comenzado sobre superficies minerales, quizás en fangos ricos en arcilla situados en el fondo de estanques abastecidos por manantiales termales [*véase* “Origen mineral de

EL CAMINO HACIA LA VIDA

Después de que las reacciones químicas generasen los primeros materiales de construcción genéticos y otras moléculas orgánicas, los procesos geofísicos los trasladaron a nuevos ambientes, donde se concentraron. Las sustancias químicas se ensamblaron para dar lugar a moléculas de mayor complejidad y, posteriormente, a las células primitivas. Hace alrededor de 3700 millones de años la geofísica podría haber contribuido a que esas “protocélulas” se reprodujesen.



CAMPOS DE CULTIVO DEL ARN
En las disoluciones acuosas donde se formaron, los nucleótidos habrían tenido muy pocas posibilidades de combinarse para generar largas hebras con capacidad de almacenar información genética. Pero en las condiciones adecuadas (por ejemplo, si las fuerzas de adhesión moleculares los fuesen acumulando entre capas microscópicas de arcilla, arriba), los nucleótidos podrían enlazarse para dar lugar a hebras sencillas y semejantes al ARN moderno.

ANDREW SWIFT

ALTERNATIVAS AL MODELO DE “PRIMERO EL ARN”

PRIMERO EL APN: El ácido peptidonucleico (APN) consta de bases nitrogenadas unidas a un esqueleto similar al de las proteínas. Como el APN es más sencillo y químicamente más estable que el ARN, algunos investigadores creen que podría haber sido el polímero genético de las primeras formas de vida que surgieron en la Tierra.

PRIMERO EL METABOLISMO: Las dificultades para explicar cómo se formó el ARN a partir de la materia inanimada han llevado a algunos investigadores a defender la teoría de que la vida surgió primero en forma de entramados de catalizadores que procesaban la energía.

PANSPERMIA: Puesto que “sólo” unos pocos cientos de millones de años separan la formación de la Tierra de la aparición de las primeras formas de vida, algunos científicos han sugerido que los primeros organismos terrestres podrían haber sido visitantes procedentes de otros mundos.

Extremo frío del estanque

Extremo caliente del estanque

REPRODUCCION ASISTIDA

Una vez liberados de la arcilla, los polímeros recién formados podrían verse engullidos por sacos rellenos de agua, conforme los ácidos grasos se iban ensamblando entre sí espontáneamente para generar membranas. Probablemente, esas protocélulas necesitaron algún "empujón" externo adicional para empezar a duplicar su material genético y, por tanto, a reproducirse.
En uno de los escenarios posibles (*derecha*), las protocélulas circulaban entre los extremos caliente y frío de un estanque que estaría parcialmente helado en un extremo (la Tierra primitiva era mayoritariamente fría) y descongelado en el otro gracias al calor de un volcán.
En el extremo frío, las hebras sencillas de ARN (1) habrían actuado como moldes en los cuales los nuevos nucleótidos formaban pares de bases (las A se emparejarían con los U y las C con las G), para generar dobles hebras (2). En el extremo caliente, el calor separaría las dobles hebras (3). Las membranas podrían también ir creciendo lentamente (4) hasta que la protocélula se dividiese en dos protocélulas "hijas" (5), que comenzarían nuevamente el ciclo.
Una vez puestos en marcha los ciclos de reproducción, daría comienzo la evolución (impulsada por mutaciones aleatorias) y, en algún momento, las protocélulas adquirirían la capacidad para reproducirse por su cuenta. Habría comenzado la vida.

1 Los nucleótidos entran y forman la hebra complementaria
2 Las protocélulas alcanzan la "madurez"
3 El calor separa las hebras
4 La membrana incorpora nuevas moléculas lipídicas y crece
5 La protocélula se divide y las células hijas repiten el ciclo
Dirección de la convección
Células hijas
Moléculas lipídicas
Nucleótidos
Doble hebra de ARN

la vida", por Robert M. Hazen; Investigación y Ciencia, junio de 2001].

Ciertamente, descubrir el modo en que surgieron los polímeros genéticos no resolvería por sí mismo el problema del origen de la vida. Para estar "vivos", los organismos deben crecer y multiplicarse, un proceso que incluye el copiado de la información genética. En las células modernas, son las enzimas, moléculas de naturaleza proteica, quienes desempeñan tal función de copiado.

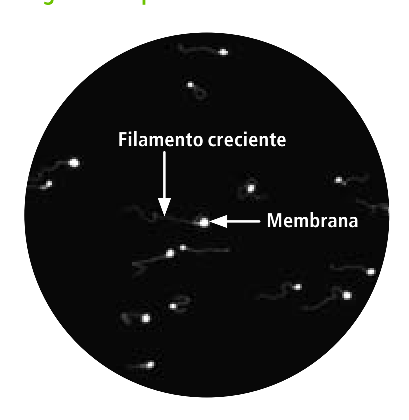
Pero los polímeros genéticos, si constan de las secuencias de nucleótidos adecuadas, pueden plegarse para dar lugar a formas complejas y pueden catalizar reacciones químicas, tal y como hacen las enzimas en la actualidad. Por tanto, parece probable que el ARN de los primeros organismos pudiese haber dirigido su propia replicación. Ese concepto ha inspirado varios experimentos, en nuestro laboratorio y en el de David Bartel, del Instituto de Tecnología de Massachusetts; conseguimos en ellos la "evolución" hacia nuevas ribozimas.

Comenzamos con billones de secuencias aleatorias de ARN. Seleccionamos las que poseían propiedades catalíticas y realizamos copias de ellas. En cada ronda de replicación, algunas de las nuevas hebras de ARN sufrieron mutaciones que las convirtieron en catalizadores más eficaces; de nuevo, las seleccionamos para las siguientes tandas de replicación. Aplicando esa evolución dirigida, obtuvimos ribozimas dotadas de capacidad para catalizar la copia de hebras relativamente cortas de otras moléculas de ARN, aunque todavía estaban muy lejos de poder copiar polímeros que mantuviesen su misma secuencia en las moléculas de ARN de la progenie.

En fecha reciente, el principio de la autoreplicación del ARN se ha visto reforzado gracias a Tracey Lincoln y Gerald Joyce, del Instituto Scripps de Investigación, que han desarrollado dos ribozimas de ARN, cada una de las cuales realiza copias de la otra mediante la unión de dos hebras más cortas de ARN. Por desgracia, el éxito del experimento requiere la presencia de fragmentos preexistentes de ARN, que son demasiado largos y complejos para haberse acumulado de forma espontánea. Aun así, el resultado sugiere que el ARN posee una capacidad catalítica rudimentaria que le permite catalizar su propia replicación.

¿Existe una alternativa más sencilla? Actualmente, nuestro grupo, al igual que otros, está explorando rutas químicas para copiar moléculas genéticas sin necesidad de catalizadores. En experimentos recientes comenzamos con hebras sencillas de ADN, que hacían de

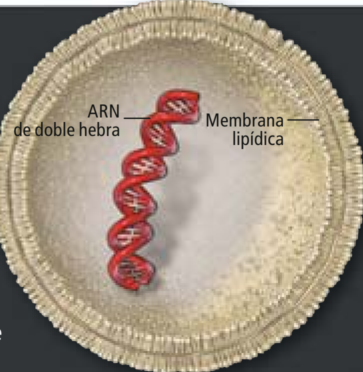
2. LAS MEMBRANAS LIPIDICAS se autoensamblan a partir de moléculas de ácidos grasos disueltas en agua. Las membranas empiezan esféricas y posteriormente, conforme van incorporando nuevos ácidos grasos, se configuran en filamentos (*micrografía*). Se convierten en tubos largos y finos que se rompen para dar lugar a esferas de menor tamaño. Las primeras protocélulas podrían haber seguido esa pauta de división.



DE "COUPLED GROWTH AND DIVISION OF MODEL PROTOCELL MEMBRANES", POR TING F. ZHU Y JACK W. SZOSTAK, EN *JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY*, VOL. 131, Nº 15; 22 DE ABRIL DE 2009

Viaje hasta la célula moderna

Una vez iniciada la vida, la competencia entre las formas de vida impulsó el avance hacia organismos de complejidad creciente. Puede que nunca sepamos los detalles exactos de la evolución temprana. Pese a ello, avanzamos aquí una posible secuencia de los principales acontecimientos que condujeron desde la primera protocélula hasta las células basadas en el ADN como, por ejemplo, las bacterias.



1 COMIENZA LA EVOLUCION ▲
La primera protocélula corresponde a un saco que contiene agua y ARN; necesita un estímulo externo (como los ciclos de calor y frío) para reproducirse. Pronto adquirirá nuevas características.

2 ARN CATALIZADORES ▼
Surgen las ribozimas (moléculas de ARN plegadas, análogas a las enzimas de naturaleza proteica) y se encargan de funciones como la de aumentar la velocidad de la reproducción y fortalecer la membrana de la protocélula. En consecuencia, las protocélulas empiezan a reproducirse por su cuenta.



Energía
Productos de desecho
Ribozima
Nutrientes

3 COMIENZA EL METABOLISMO ▲
Otras ribozimas catalizan el metabolismo: series de reacciones químicas que permiten que las protocélulas se surtan de los nutrientes del entorno.

ANDREW SWIFT

LA VIDA, REINVENTADA

Los científicos que estudian el origen de la vida esperan construir un organismo autorreplicante a partir de ingredientes artificiales. El mayor reto consiste en encontrar una molécula genética con capacidad de copiarse a sí misma de manera autónoma. En sus intentos por hallar tan escurridiza propiedad, los autores y sus colaboradores están diseñando y sintetizando versiones de ARN y de ADN modificadas químicamente. Es probable que el ARN no sea la solución: a menos que sean muy cortas, sus dobles hebras no se separan fácilmente para estar listas para la replicación.

"molde" (utilizamos ADN porque es más sencillo y barato trabajar con él, pero podríamos haber utilizado igualmente ARN). Añadimos los moldes a una disolución que contenía nucleótidos aislados para ver si los nucleótidos se unirían al molde por complementariedad entre las bases (la A se une a la T y la C se une a la G), para después polimerizar y formar así una doble hebra. Esta sería la primera etapa de la replicación: una vez formada la doble hebra, la separación de las hebras complementarias permitiría que cada una de ellas sirviese de molde para fabricar una copia de la hebra original. En el caso del ADN o el ARN estándar, el proceso cursa con exasperante lentitud. Pero pequeñas modificaciones en la estructura química del azúcar (cambio de una pareja de átomos de oxígeno e hidrógeno por un grupo amino, integrado por nitrógeno y oxígeno) hicieron que la polimerización fuese cientos de veces más rápida, de modo que las hebras complementarias se formaban en cuestión de horas, en lugar de semanas. El nuevo polímero se comportaba de modo muy parecido al ARN clásico, pese a contener enlaces nitrógeno-fósforo y no los enlaces normales oxígeno-fósforo.

Membranas protectoras

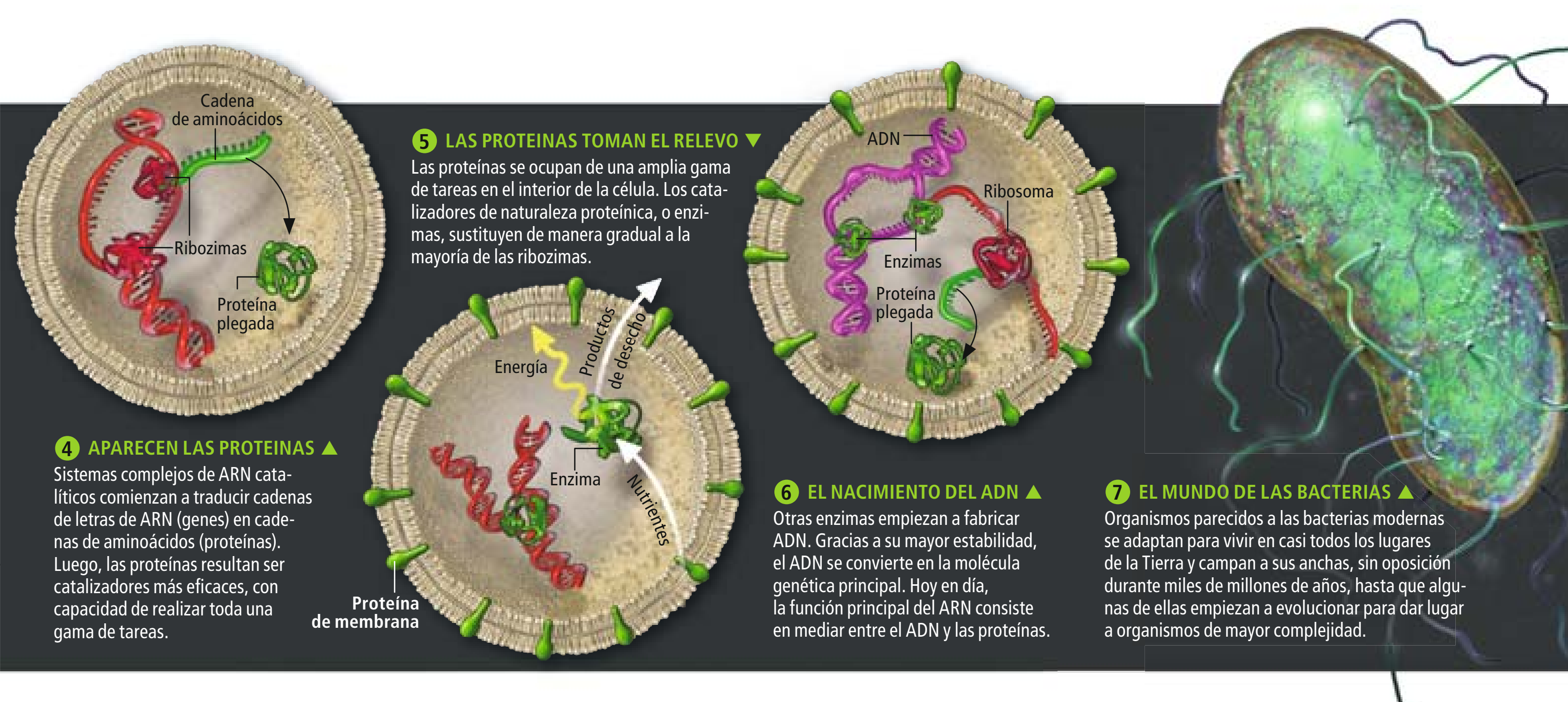
Si admitimos que las lagunas en nuestro conocimiento sobre la química del origen de la vida podrán colmarse algún día, podemos empezar a considerar cómo habrían interaccionado las moléculas para ensamblarse y dar lugar a las primeras estructuras con aspecto de células, o "protocélulas".

Las membranas que rodean a las células modernas constan fundamentalmente de una bicapa lipídica: una doble lámina formada por moléculas oleaginosas, como los fosfolípidos y el colesterol. Las membranas mantienen físicamente unidos los componentes celulares y crean una barrera que impide el tránsito indiscriminado de moléculas voluminosas. Proteínas refinadas integradas en la membrana operan a modo de guardianes y transportan moléculas hasta el interior o hacia el exterior de la célula; otras intervienen en la construcción y la reparación de la membrana. ¿Cómo logró una protocélula rudimentaria, carente de la maquinaria proteínica, llevar a cabo esas funciones?

Probablemente, las membranas primitivas estaban formadas por moléculas más sencillas, como los ácidos grasos (unos de los componentes de los fosfolípidos, moléculas de mayor complejidad). Estudios realizados a finales de los años setenta demostraron que las membranas se ensamblaban de forma espontánea a partir de ácidos grasos, pero la impresión general era que estas membranas seguirían constituyendo una barrera colosal para la entrada en la célula de nucleótidos y otros nutrientes complejos.

Por eso mismo, se aventuró que lo primero que hubo de desarrollarse fue el metabolismo celular, para que las células adquiriesen la capacidad de sintetizar los nucleótidos por sí mismas. Sin embargo, los trabajos realizados en nuestro laboratorio han demostrado que moléculas del tamaño de los nucleótidos pueden deslizarse fácilmente a través de las membranas, siempre y cuando se trate de las versiones más sencillas y más "primitivas" de los nucleótidos y las membranas actuales.

Un descubrimiento que nos permitió realizar un sencillo experimento que se proponía reproducir la capacidad de una protocélula para copiar su información genética mediante nutrientes suministrados por el entorno.



Así fue su desarrollo: preparamos vesículas rodeadas por una membrana de ácidos grasos que contenían en su interior un pequeño fragmento de ADN de hebra sencilla. La función del ADN consistía en servir de molde para la fabricación de una nueva hebra. A continuación, expusimos esas vesículas a las versiones químicamente activas de los nucleótidos. Los nucleótidos atravesaron de forma espontánea la membrana; una vez en el interior de la protocélula modelo, se alinearon sobre la hebra de ADN y reaccionaron entre sí para generar una hebra complementaria. El experimento respaldaba la tesis de que las primeras protocélulas contenían ARN (o algo parecido) y poco más, y que replicaban su material genético sin necesidad de enzimas.

División celular

Para que las protocélulas empezaran a reproducirse debieron tener la capacidad de crecer, duplicar su contenido genético y dividirse y así generar dos células "hijas" equivalentes. Los experimentos han demostrado que las vesículas primitivas crecen, al menos, de dos formas. En un trabajo pionero realizado en los años noventa, Pier Luigi Luisi y sus colaboradores, del Instituto Federal Suizo de Tecnología en Zúrich, añadieron nuevos ácidos grasos al agua que rodeaba a esas vesículas. Las membranas reaccionaron incorporando los ácidos grasos y aumentando su área superficial. A medida que el agua, junto con las sustancias disueltas, penetraba lentamente en su interior, el volumen de la célula iba incrementándose.

Otra segunda estrategia, que estudió en nuestro laboratorio Irene Chen, mientras preparaba el doctorado, implicaba la competencia entre protocélulas. Las protocélulas modelo llenas de ARN o de materiales similares se hinchaban (efecto osmótico que resulta del intento del agua por entrar en la célula para igualar las concentraciones interior y exterior). Así, la membrana de esas vesículas hinchadas se vio sometida a una tensión que impulsaba el crecimiento, porque la adición de nuevas moléculas relajaba la tensión sobre la membrana, lo que disminuía la energía del sistema. De hecho, las vesículas hinchadas crecían con la usurpación de ácidos grasos a las vesículas vecinas relajadas, que, en correspondencia, se encogían.

En 2008, Ting Zhu, doctorando de nuestro laboratorio, observó el crecimiento de protocélulas modelo tras suministrarles ácidos grasos. Para nuestra sorpresa, las vesículas, que en un principio eran esféricas, no crecían por simple aumento de tamaño. Primero desarrollaban un fino filamento. Durante media hora, el filamento extendido aumentó su tamaño y grosor, hasta que la vesícula inicial se fue transformando progresivamente en un tubo largo y delgado. Esa estructura era bastante frágil; bastaba una ligera agitación (como la que origina el movimiento ondulatorio en un estanque) para que se fragmentase en una serie de protocélulas hijas más pequeñas y esféricas, que posteriormente aumentaban de tamaño y repetían el ciclo.

A partir de ahí, en presencia de los materiales de construcción adecuados, la formación de protocélulas no parece ser tan difícil: las membranas se autoensamblan, los polímeros genéticos se autoensamblan y los dos componentes se juntan mediante la formación de las membranas en torno a polímeros preexistentes, entre otras posibilidades. Estos sacos que contienen agua y ARN también crecerán, absorberán nuevas moléculas, competirán por los nutrientes y se dividirán. Mas, para cons-

Los autores

Alonso Ricardo es investigador del Instituto Médico Howard Hughes de la Universidad de Harvard. Su interés se centra en el origen de la vida; en la actualidad estudia sistemas químicos autorreplicantes. **Jack W. Szostak** es profesor de genética en la facultad de medicina de Harvard y del Hospital General de Massachusetts. Su interés por la construcción en el laboratorio de estructuras biológicas como medio para comprobar nuestros conocimientos sobre los mecanismos biológicos se remonta a los cromosomas artificiales que describió en *Investigación y Ciencia* en enero de 1988. Acaba de recibir el premio Nobel de fisiología y medicina.

tituir vida, deberían reproducirse y evolucionar. En concreto, tendrían que separar sus dobles hebras de ARN para que cada hebra sencilla hiciera de molde con el que generar una nueva doble hebra que fuera transmitida a una célula hija.

Ese proceso no habría comenzado por sí mismo, pero podría haber contado con una pequeña ayuda. Imaginemos una región volcánica sobre la fría superficie de la Tierra primitiva (por aquel entonces, el Sol brillaba con tan sólo el 70 por ciento de su intensidad actual). Podría haber charcos de agua fría, quizá parcialmente cubiertos de hielo, que se mantenían en estado líquido gracias a las rocas calientes. Las diferencias de temperatura generarían corrientes de convección; las protocélulas del agua se verían expuestas de vez en cuando a una oleada de calor cuando pasaran cerca de las rocas calientes y se enfriarían, casi de inmediato, conforme el agua caliente volviera a mezclarse con el agua fría, que constituía la mayor parte. El calentamiento repentino haría que la doble hélice se separase para dar lugar a hebras sencillas. Al volver a la zona fría se formarían nuevas dobles hebras (copias de la original) a medida que las hebras sencillas actuasen como molde.

En el mismo instante en que el entorno proporcionó a las protocélulas el impulso necesario para empezar a reproducirse, se puso en marcha la evolución. Concretamente, en algún momento mutaron algunas de las secuencias de ARN, convirtiéndose en ribozimas que aceleraron el proceso de copiado del ARN, sumando así una ventaja competitiva. Andando el tiempo, las ribozimas comenzaron a copiar el ARN sin ayuda externa.

Es relativamente fácil imaginar el modo en que, desde entonces, pudieron haber evolucionado las protocélulas basadas en el ARN. El metabolismo podría haber surgido de forma gradual, a medida que las nuevas ribozimas permitían a las células sintetizar nutrientes en su interior a partir de materiales básicos más sencillos y abundantes. A continuación, los organismos podrían haber añadido la fabricación de proteínas a su repertorio de trucos químicos.

Después, gracias a su asombrosa versatilidad, las proteínas habrían asumido las funciones del ARN a la hora de ayudar a copiar el material genético, así como en el metabolismo. Posteriormente, los organismos habrían "aprendido" a fabricar ADN, adquiriendo así la ventaja de poseer un portador de información genética más robusto. En ese punto, el mundo del ARN se habría convertido en el mundo del ADN y habría comenzado la vida tal y como la conocemos.

Bibliografía complementaria

SYNTHESIZING LIFE. Jack Szostak, David P. Bartel y P. Luigi Luisi en *Nature*, vol. 409, págs. 387-390; enero, 2001.

GENESIS: THE SCIENTIFIC QUEST FOR LIFE'S ORIGINS. Robert M. Hazen. Joseph Henry, 2005.

THE RNA WORLD. Dirigido por Raymond F. Gesteland, Thomas R. Cech y John F. Atkins. Tercera edición. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2006.

EL ORIGEN DE LA VIDA. Robert Shapiro en *Investigación y Ciencia*, n.º 371, págs. 18-25; agosto, 2007.

UNA NUEVA BIOMOLECULA. Peter Nielsen en *Investigación y Ciencia*, n.º 390, págs. 24-31; marzo, 2009.

EL ORIGEN DE LAS CELULAS

TONI GABALDON

Todos los organismos celulares de nuestro planeta derivan de un antepasado común. El análisis de genomas completos de cientos de especies actuales nos permite reconstruir cómo pudo ser

La diversidad de la vida celular en nuestro planeta se divide en tres grandes dominios: bacterias, arqueas y eucariotas. Cada uno de estos grupos de organismos tiene rasgos estructurales y bioquímicos propios que los definen sin ambigüedades. Por ejemplo, las células eucariotas son las únicas que poseen un núcleo celular donde se almacena el material genético, mientras que las arqueas poseen membranas con una composición química muy particular.

A pesar de tales diferencias, los tres tipos de organismos comparten una serie de características unificadoras que sugieren un origen común para todos ellos. Dicha hipótesis se confirmó con las primeras comparaciones de secuencias de ácidos nucleicos de organismos de los tres dominios (*véase la figura 2*): su parecido no podría explicarse sin admitir que derivaron de una secuencia ancestral común para todas ellas.

LUCA

Al organismo ancestral del que derivaron los tres grupos se le conoce con el nombre de LUCA (de las siglas en inglés de "último ancestro común universal"). Hay un gran interés por saber cuáles pudieron ser sus características. Conocerlas nos permitiría inferir el ambiente en el que pudo vivir y, por tanto, ayudaría a formular hipótesis sobre dónde y cómo vivieron las primeras células hace unos 3500 millones de años.

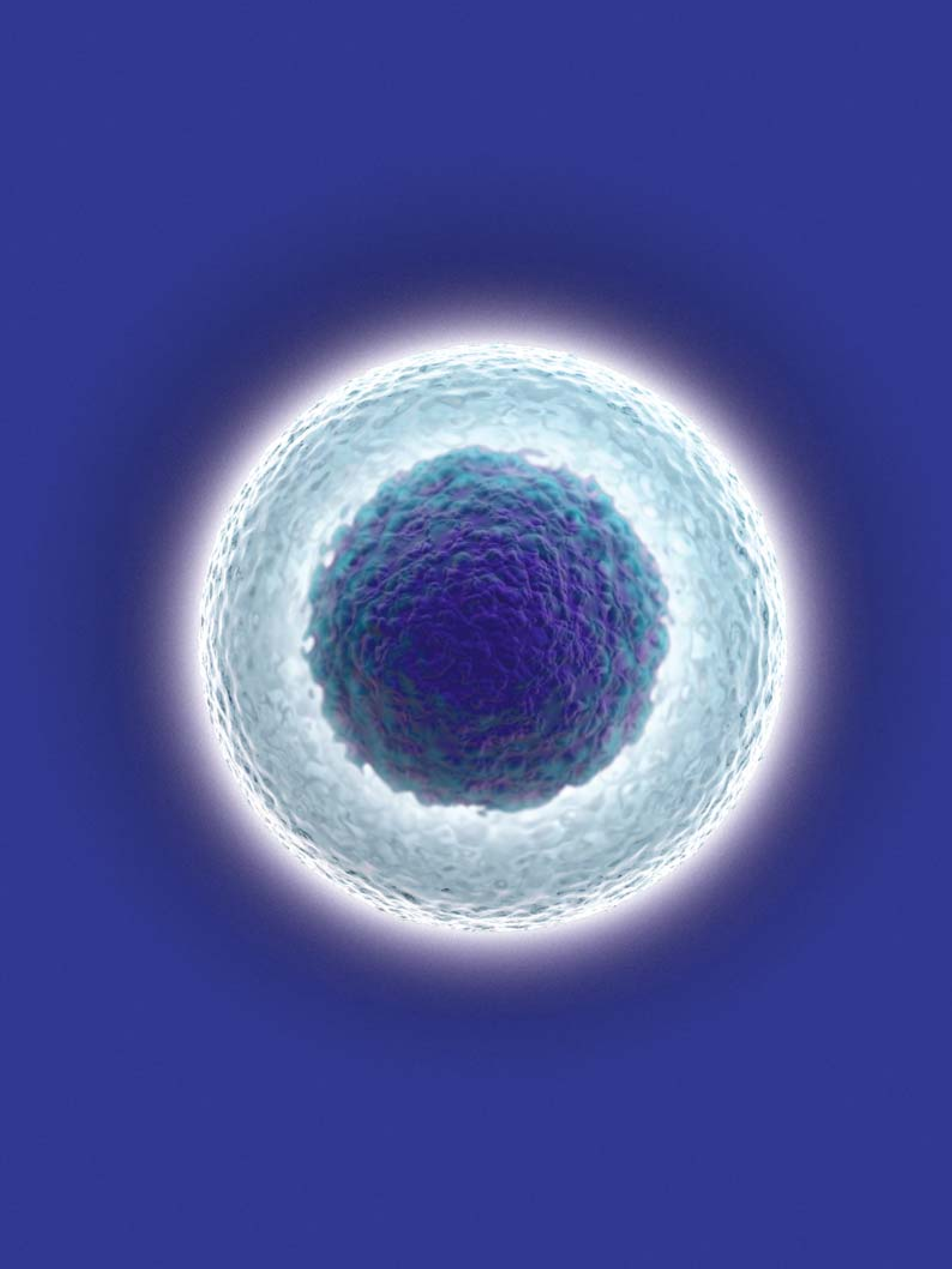
Semejante tarea es harto difícil. En primer lugar, existe la posibilidad de que muchas de las piezas del rompecabezas que intentamos reconstruir se hayan perdido para siempre, y algunas de las que quedan quizá hayan cambiado tanto que nos sea imposible reconocerlas. Una manera de aproximarse al problema consiste en comparar la diversidad celular actual para reconstruir un arquetipo de LUCA. Observando qué elementos son comunes a los tres grupos, podemos hacernos una idea sobre qué características exhibía LUCA.

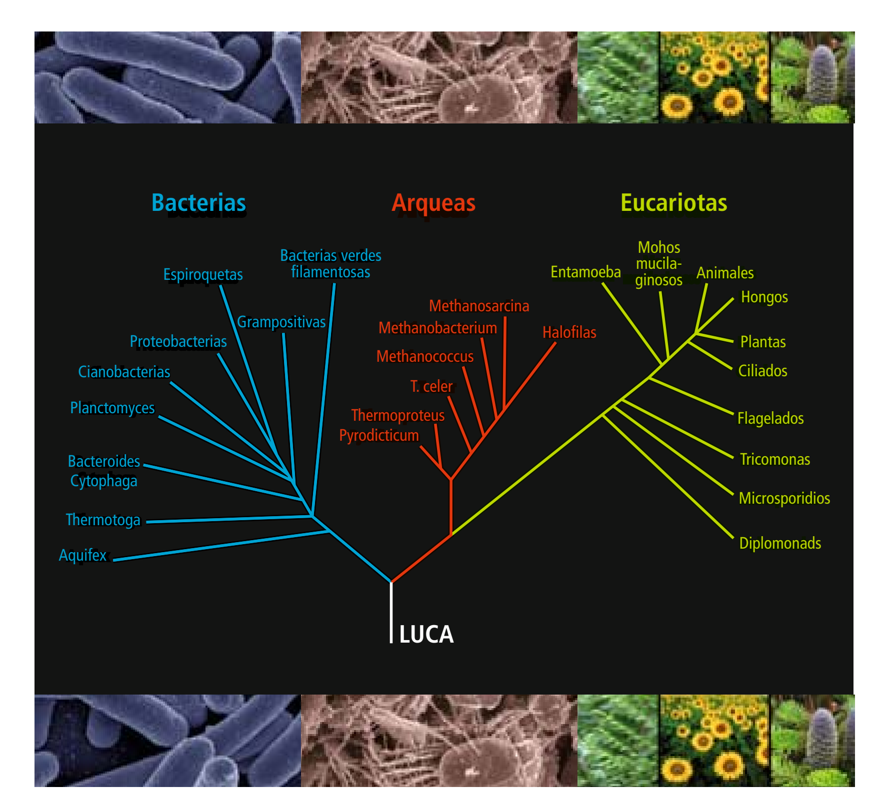
En la actualidad disponemos de un tipo de datos muy valioso para aproximarnos a la reconstrucción de LUCA: los genomas. El genoma de un organismo, su repertorio completo de genes, nos informa sobre qué proteínas pueden estar presentes en la célula (su proteoma). Como las proteínas son las responsables del metabolismo del organismo, de su estructura y de su interacción con el ambiente, el análisis de la composición de un

1. ¿COMO FUE EL ULTIMO ANCESTRO COMUN de nuestras actuales células eucariotas (una, aquí representada) y de los otros tipos de organismos celulares?

CONCEPTOS BASICOS

- La genómica comparada permite reconstruir la evolución de la vida celular en nuestro planeta.
- Estudios recientes han reconstruido el proteoma del último ancestro común de todos los organismos (LUCA), que vivió hace unos 3500 millones de años.
- Este organismo ya poseía una alta complejidad, en muchos aspectos equiparable a la de organismos unicelulares actuales.
- Persisten dudas acerca de algunas características de LUCA, como la composición química de sus membranas o su genoma.





2. EL ARBOL DE LA VIDA según la reconstrucción clásica basada en la comparación de moléculas de ARN ribosómico. Algunas de las posiciones filogenéticas aquí indicadas se han modificado en la actualidad (así, la posición basal de los microspordios, ahora considerados entre los hongos); la posición relativa de arqueas, eucariotas y bacterias sigue siendo objeto de debate hoy día.

IMAGEN MODIFICADA DE WIKIPEDIA

proteoma sirve para inferir muchas cosas sobre las características de un organismo, tales como su fisiología, estilo de vida, etcétera. Así, el problema de reconstruir LUCA se puede plantear como el de reconstruir su proteoma.

Hay ya una gran cantidad de genomas secuenciados, de más de mil especies distintas. Podemos considerar esa ingente cantidad de datos una muestra del contenido genético de los descendientes actuales de LUCA. La reconstrucción del proteoma de LUCA a partir de estos datos requiere distinguir qué componentes de los genomas actuales son ancestrales, es decir, descienden directamente del genoma de LUCA. Para ello se comparan las secuencias de todos los genomas, se agrupan los genes en familias (grupos de genes con origen común) y se establece la distribución de todas esas familias a lo largo de las diferentes especies (la distribución filogenética). Después, se analiza la distribución filogenética de cada familia de proteínas y se evalúa la posibilidad de que fueran componentes del proteoma ancestral.

Alrededor de 50 familias de proteínas se encuentran codificadas en todos los genomas secuenciados y un centenar adicional está en más de un 95 por ciento de los genomas, faltando únicamente en algunos genomas de reducido tamaño pertenecientes a organismos parásitos o simbiontes. Dada su universalidad, la explicación más verosímil es que estas familias desciendan directamente de las presentes en el proteoma ancestral de LUCA. Para las demás familias, cuya distribución es menos homogénea, la respuesta es más compleja. Dar por sentado que todas las que se encuentran en alguna especie actual estaban presentes en LUCA es poco realista, ya que nos llevaría a suponer un organismo ancestral con un genoma mucho mayor que el de la inmensa mayoría de las especies unicelulares actuales.

Proteomas ancestrales

En la práctica, para resolver si una determinada familia de proteínas con una distribución filogenética propia es ancestral se utilizan modelos probabilísticos. Estos modelos tienen en cuenta las relaciones evolutivas de las especies y la posibilidad de que un gen se haya perdido en un genoma o que se haya incorporado a él en un tiempo más reciente. Para explicar las distribuciones filogenéticas actuales, se opta por los supuestos evolutivos más parsimoniosos, es decir, los que impliquen un menor número de eventos evolutivos, siendo éstos, además, los que se considere que fueron más probables. Si el supuesto más parsimonioso es el que implica una presencia de la familia en LUCA, entonces a esa familia se la considerará ancestral.

Un mecanismo evolutivo que complica sobremanera estos modelos es la transferencia horizontal de genes, un proceso común en bacterias, por el cual el material genético puede pasar de un organismo a otro. Unos pocos eventos de transferencia horizontal pueden crear distribuciones filogenéticas muy complejas, en las que una familia génica está presente en pocas especies aunque muy dispares. No es trivial distinguir estos casos de aquellos en los que un gen ancestral se ha perdido en numerosos linajes, algo que puede también ocurrir con cierta frecuencia.

Los modelos de reconstrucción de proteomas ancestrales comparan la probabilidad de ambas situaciones, empleando para ello parámetros inferidos a partir de nuestros conocimientos sobre los mecanismos evolutivos de los genomas actuales.

Otra dificultad a la que se enfrenta la reconstrucción de proteomas ancestrales estriba en que nuestro conocimiento de las relaciones evolutivas entre los diferentes grupos de especies, el llamado árbol de la vida, es incompleto. Distintas hipótesis sobre la topología de este árbol de especies pueden alterar el conjunto de proteínas que consideraríamos ancestrales, especialmente en algunas familias que están presentes en sólo dos de los tres dominios. En particular, como se analiza más adelante, la posición de la raíz del árbol de la vida repercute sobre algunos aspectos de la reconstrucción de LUCA.

A pesar de las dificultades, los distintos modelos utilizados suelen coincidir en clasificar unas 500 o 600 familias de proteínas como ancestrales, es decir, descendientes directas del proteoma de LUCA. Este número se considera un límite inferior al verdadero tamaño del proteoma, codificado por el genoma ancestral de LUCA, que debía de contener unos pocos miles de genes, como la mayoría de los organismos unicelulares actuales. A pesar de que el rompecabezas está incompleto, el análisis de sus piezas permite contrastar diferentes hipótesis sobre el origen y evolución de la vida celular en nuestro planeta.

Presencias

Entre las proteínas presentes en la reconstrucción del proteoma ancestral se cuenta el repertorio, casi completo, de la maquinaria de transcripción y traducción, los procesos mediante los cuales los genes se copian a mensajeros de ARN y éstos a su vez se traducen en proteínas. Así se deduce que la evolución del código genético y la complejidad del mecanismo de traducción precedieron a LUCA.

En el proceso de traducción de mensajeros de ARN en proteínas, muy refinado, intervienen grandes estructuras formadas por ARN y decenas de proteínas diferentes organizadas en una conformación tridimensional específica. Además, para asegurar que el mensajero de ARN se decodifica de manera adecuada, se necesitan moléculas adaptadoras (ARN de transferencia), específicas para cada uno de los 20 aminoácidos que forman parte de las proteínas.

Todo indica que este sistema estaba ya presente en LUCA y que el mecanismo de funcionamiento debió de ser similar al de las células modernas. Llama la atención tan alto grado de complejidad en un organismo ancestral. Sin embargo, conviene recordar que LUCA corresponde al paso previo a la diversificación de los tres dominios celulares y no al momento concreto de aparición de la primera célula, si es que LUCA era ya una célula tal y como las conocemos actualmente (volveré más adelante sobre esto). Así, a LUCA le debieron preceder muchas fases de evolución celular o precelular anteriores, supuestamente de menor complejidad.

En cuanto a las capacidades metabólicas de LUCA, hay también algunas rutas que se pueden reconstruir casi por completo a partir de las proteínas presentes en el proteoma ancestral reconstruido. Entre ellas, la glicólisis. Esta ruta metabólica, compuesta por diez pasos catalizados por enzimas, se halla presente, con mínimas diferencias, en la inmensa mayoría de los organismos secuenciados. Gracias a ella, LUCA podría catabolizar glucosa, es decir, obtener de ella energía en forma de ATP (adenosín trifosfato) al descomponerla en moléculas más simples, de piruvato, con las que sintetizaría numerosas moléculas. Otra ruta del metabolismo primario que parece haber estado presente es el ciclo del ácido cítrico (ciclo de Krebs), en el que el piruvato podría haber continuado su transformación para entrar en las rutas de síntesis de otros compuestos.

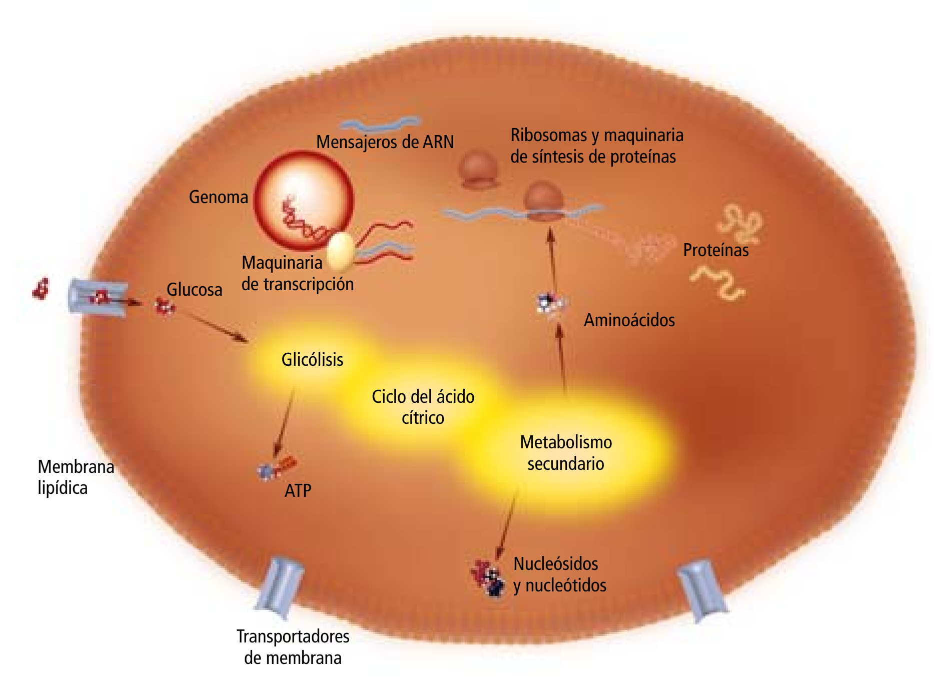
La presencia en el proteoma ancestral de la mayoría de las rutas de síntesis de aminoácidos y nucleótidos sugiere que LUCA podía fabricar los componentes esenciales que forman las proteínas y los ácidos nucleicos. De ello se infiere que LUCA no habitaba un medio rico en estos constituyentes. Se trataba, pues, de un medio menos complejo que la supuesta sopa primordial, rica en nutrientes, aminoácidos y nucleótidos en donde se piensa que se pudo originar la vida, según algunas hipótesis.

Ausencias

Tan importante como saber qué proteínas estuvieron presentes en LUCA, es conocer las grandes ausencias. Entre las familias de proteínas de cuya distribución actual es difícil inferir una descendencia directa desde LUCA se encuentran algunas que consideraríamos esenciales en las células modernas. Por ejemplo, llama poderosamente la atención la aparente ausencia de rutas de síntesis de lípidos (componentes de las membranas celulares) y de la maquinaria necesaria para copiar el ADN, lo que ha planteado numerosas incógnitas.

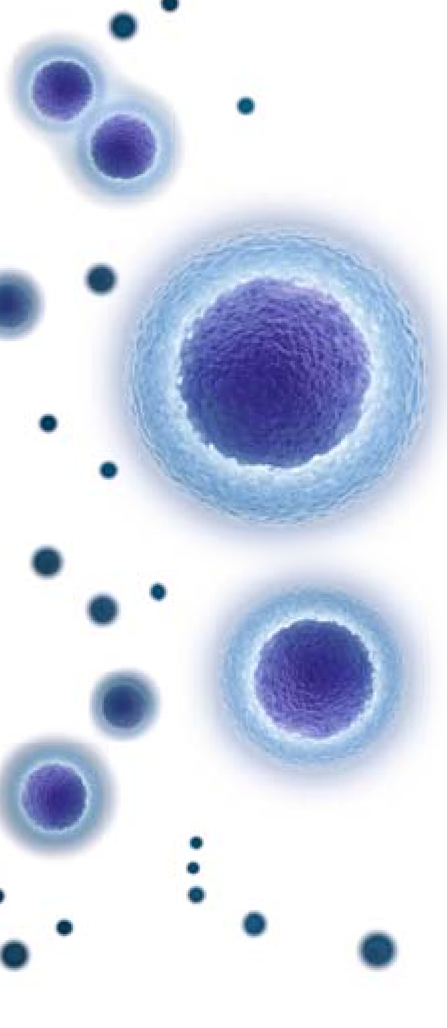
El autor

Toni Gabaldón dirige el grupo de genómica comparada del Centro de Regulación Genómica y es profesor asociado de la Universidad Pompeu Fabra, en Barcelona. Sus investigaciones van dirigidas a entender cómo se originan y evolucionan los sistemas biológicos complejos —rutas metabólicas, estructuras celulares o genomas completos— y el uso de dicha información para predecir la función de genes o proteínas que no se han caracterizado experimentalmente.



3. VISION ESQUEMATICA de una posible reconstrucción de LUCA.

TONI GABALDON



La falta de una maquinaria para el mantenimiento y copia del ADN ha llevado a conjeturar que el genoma de LUCA consistiese en ARN. Sin embargo, la presencia en el proteoma ancestral de varias enzimas implicadas en la biosíntesis de desoxirribonucleótidos que son componentes específicos del ADN sugiere que esta molécula estuvo presente en LUCA.

Para reconciliar ambos hechos se ha propuesto la existencia de una replicación similar a la de los retrovirus (virus de ARN), que utilizan un intermediario de ADN para la replicación de su genoma. Sin embargo, podría ocurrir que las proteínas necesarias para la replicación de un genoma de ADN no estén en la reconstrucción mínima del proteoma ancestral, simplemente porque no somos capaces de reconstruir de manera apropiada la evolución de las familias correspondientes. Después de todo, estamos trabajando con una estimación de mínimos.

El problema de la composición de la membrana celular de LUCA es quizá más difícil de resolver. En los organismos actuales, la composición de las membranas celulares de las arqueas es radicalmente diferente de la que tienen las membranas de las células eucariotas y bacterianas. Mientras que las membranas celulares de las arqueas se hallan compuestas por isoprenoides (un tipo de lípido), las de bacterias y eucariotas vienen constituidas por ácidos grasos (otro tipo de lípido). Aunque en bacterias y eucariotas existen también isoprenoides, nunca forman parte de la membrana celular y se sintetizan a través de rutas distintas de las seguidas por las arqueas.

¿Qué tipo de membrana celular poseía LUCA? La respuesta a esta pregunta depende de dónde enraicemos el árbol de la vida, algo muy controvertido. La visión clásica y más extendida del árbol de la vida (*véase la figura 2*) agrupa a eucariotas y arqueas y les supone un ancestro. En esta reconstrucción, la raíz se halla situada entre las bacterias y la rama común de arqueas y eucariotas. Este escenario sugiere que LUCA tuvo membranas de tipo bacteriano/eucariota y que las arqueas debieron de sufrir un cambio en la composición de sus membranas. Situar la raíz en las arqueas tal y como sugieren otros autores, por el contrario, implicaría una membrana ancestral con isoprenoides, que se sustituyó más tarde en eucariotas y bacterias.

Como se ve, asumir que LUCA poseía una membrana lipídica, sea de isoprenoides o de ácidos grasos, implica que, en alguna de las ramas del árbol de la vida, ocurrió un cambio radical en su composición química. Para eludir ese paso, algunos investigadores han propuesto la posibilidad de que LUCA no poseyera membranas lipídicas, sino que estuviese confinada en microcompartimentos inorgánicos. Tal circunstancia posibilitaría que dos invenciones independientes de membranas de distinta composición química provocaran sendos “escapes” a una vida celular tal y como la conocemos. Sin embargo, este modelo no carece de problemas, ya que no explicaría la presencia de algunas bombas y transportadores de membrana en la reconstrucción del proteoma ancestral.

Finalmente, llama la atención la ausencia de proteínas implicadas en la división celular y la regulación del ciclo celular, y de factores que regulen la expresión de los genes (factores de transcripción). A tenor de estos datos, LUCA era más simple que las células actuales en cuanto a su capacidad de respuesta al medio, lo que podría implicar un ambiente estable y homogéneo. La ausencia de proteínas implicadas en la división celular no es incompatible con la existencia de una membrana, ya que las primeras células pudieron haberse dividido espontáneamente por crecimiento y rotura.

Verosimilitud e incertidumbre

En resumen, la reconstrucción del proteoma ancestral de LUCA nos proporciona una visión parcial de lo que pudo ser aquel organismo. Hemos de observar estos datos como quien examina el yacimiento arqueológico de un poblado de la antigüedad e intenta adivinar cómo vivieron sus habitantes a partir de los objetos que encuentra.

La reconstrucción más verosímil de LUCA sugiere un organismo dotado de un sistema de procesamiento de la información genética ya muy complejo, un metabolismo central casi completo y la capacidad de sintetizar por sí mismo numerosos compuestos. Por el contrario, la capacidad de regulación de este organismo ancestral parece muy reducida y sugiere un origen más reciente de los complejos mecanismos de señalización intracelular, gracias a los cuales las células actuales están preparadas para responder ante los cambios del ambiente.

Como se puede observar quedan todavía muchas lagunas. Incertidumbres por resolver, como la presencia o no de un genoma de ADN o de membranas celulares, dependen de una mayor resolución en nuestro conocimiento del árbol de la vida. Quizá la disponibilidad de nuevas secuencias genómicas de organismos muy diversos nos permitirá en un futuro aumentar la resolución de nuestro conocimiento sobre LUCA y sobre cómo se originaron los tres grandes dominios.

Bibliografía complementaria

A MINIMAL ESTIMATE FOR THE GENE CONTENT OF THE LAST UNIVERSAL COMMON ANCESTOR — EXOBIOLOGY FROM A TERRESTRIAL PERSPECTIVE. C. A. Ozounis, V. Kunin, N. Darzentas y L. Goldovsky en *Research in Microbiology*, vol. 157, págs. 57-68; 2006.

UNIVERSAL PROTEIN FAMILIES AND THE FUNCTIONAL CONTENT OF THE LAST UNIVERSAL ANCESTOR. N. Kyrpides, R. Overbeek y C. A. Ozounis en *Journal of Molecular Evolution*, vol. 49, págs. 413-423; 1999.

GENE CONTENT OF LUCA, THE LAST COMMON UNIVERSAL ANCESTOR. Arcady Musheigan en *Frontiers in Bioscience*, págs. 4657-4666; 2008.

RECONSTRUCTION OF ANCESTRAL PROTEOMES. Toni Gabaldón y Martijn A. Huynen en *Ancestral sequence reconstruction*, dirigido por David Liberles. Oxford University Press, 2008.

EL ORIGEN DE LA MENTE

MARC HAUSER

El primer paso para esclarecer cómo surgió la mente humana consiste en determinar las propiedades específicas de nuestros procesos cognoscitivos

No hace mucho, un equipo de tres expertos extraterrestres (un ingeniero, un químico y un informático) viajó a la Tierra para evaluar la vida inteligente que pudiera albergar. El ingeniero, dirigiéndose a sus colegas, informó: "Aquí, todas las criaturas son sólidas; algunas, segmentadas y con capacidad para arrastrase por el suelo o moverse por el aire o el agua. Todas muy lentas. Nada que resulte impresionante". El químico comentó entonces: "Son bastante parecidas y constan, básicamente, de cuatro ingredientes". Por último, el experto informático opinó: "Escasa capacidad computacional. Sin embargo, una de las especies, la de los bípedos sin plumas, constituye un caso aparte. Intercambia información de formas rudimentarias e ineficientes, aunque acusadamente distintas de las demás. Esa especie crea muchos objetos raros: algunos son consumibles, otros producen símbolos y otros, todavía, destruyen a individuos de su tribu".

"¡Qué cosa más rara!", musitó el ingeniero. "Siendo tantas las semejanzas en estructura y composición química, ¿cómo puede ser tan distinta su capacidad de cómputo?" "No estoy seguro", respondió el informático, "pero, al parecer, disponen de un sistema para crear nuevas expresiones que es infinitamente más potente que los de las demás especies. Propongo que clasifiquemos a los bípedos implumes en un grupo aparte, les asignemos un origen independiente y una procedencia de otra galaxia". Los otros dos extraterrestres asintieron. Y los tres partieron velozmente hacia su base, para presentar el informe.

Tal vez no se debiera culpar a esos exploradores por situar a los humanos en una clase aparte, distinta de abejas, pájaros, castores, babuinos o bonobos. Después de todo, nuestra especie es la única que crea suflés, ordenadores, armas, cosméticos, películas, óperas, fórmulas matemáticas, leyes y religiones. No sólo es que babuinos o abejas no han horneado jamás un suflé: es que nunca han considerado esa posibilidad. Carecen, sencillamente, de la clase de cerebro que posee a la vez habilidad técnica y creatividad gastronómica.

Charles Darwin defendía en *El origen del hombre* (1871) que la diferencia entre la mente humana y la de los demás seres era "de grado y no de naturaleza". Este juicio, respetado por los estudiosos, recibió respaldo hace pocos años, al saberse que compartimos con los chimpancés alrededor de un 98 por ciento de genes. Pero si esa herencia genética compartida pudiera explicar el origen evolutivo de la mente humana, ¿por qué no hay ningún chimpancé que escriba un artículo como éste, que cante en el coro de "Aída" o que esté preparando un suflé? En realidad, cada vez hay más pruebas de que, contrariamente a la teoría de Darwin sobre la continuidad mental entre la especie humana y las demás, media un profundo hiato entre nuestro intelecto y la mente animal. No estoy afirmando que nuestras facultades mentales hayan brotado de la nada, plenamente formadas ya. Se han hallado en otras especies algunos de los elementos de nuestra cognición. Pero esas piezas básicas constituyen apenas los cimientos del rascacielos que es la mente humana. El origen evolutivo de nuestras facultades cognitivas sigue estando bastante nebuloso. No obstante, gracias a nuevos hallazgos y técnicas experimentales se están abriendo algunos claros.

CONCEPTOS BASICOS

- Charles Darwin sostenía la existencia de una continuidad mental entre los humanos y otros animales, opinión que han defendido numerosos expertos posteriores.
- Pero cada vez son más los indicios de que un enorme hiato mental nos separa de otras criaturas cercanas. El autor ha identificado cuatro aspectos exclusivos de la cognición humana.
- El origen y la evolución de esos rasgos mentales distintivos siguen siendo misteriosos, aunque lentamente se van descubriendo.

HOLLY LINDEM (*fotoilustración*); GENE BURKHARDT (*diseño*)



Una inteligencia excepcional

Para que la ciencia pueda llegar algún día a desvelar cómo adquirió ser la mente humana, habrá primero que precisar qué la sitúa aparte de la mente de otras criaturas. Aunque el hombre comparta con el chimpancé una vasta mayoría de genes, los estudios realizados sugieren que las pequeñas desviaciones génicas que ha ido experimentando nuestro linaje desde su escisión de la línea de los chimpancés han provocado diferencias notables en potencia computacional. Esa reorganización, eliminación y copiado de elementos génicos universales ha creado un cerebro dotado de cuatro propiedades especiales.

Tomadas en conjunto, esas características diferenciales, que el autor ha identificado a partir de estudios efectuados en su laboratorio y en otros lugares, constituyen lo que denomina "humanicidad".

El primero de tales rasgos es la computación generativa, la capacidad para crear una variedad prácticamente ilimitada de "expresiones", ya sean organizaciones de palabras, secuencias de notas musicales, conjuntos de acciones o cadenas de símbolos matemáticos. La computación generativa comprende dos tipos de operaciones: las recursivas y las combinatorias.

La recursión, o recurrencia, consiste en la repetición de una regla para crear expresiones nuevas. Una frase breve puede incrustarse en otra, repetidamente, y crear descripciones más extensas y ricas de nuestros pensamientos como, por ejemplo, la sencilla pero poética expresión de Gertrude Stein: "Una rosa es una rosa es una rosa." La operación combinatoria, por su parte, consiste en conjuntar elementos discretos para engendrar ideas nuevas, tal vez expresables con palabras nuevas ("parasol") o formas musicales, entre otras posibilidades.

La segunda característica distintiva de nuestra mente es su capacidad para la combinación promiscua de ideas. Conectamos sin esfuerzo pensamientos de campos de conocimiento muy dispares; ello nos permite unir lo que sabemos, por ejemplo, sobre arte, sexo, espacio, causalidad y amistad. Una mezcolanza tal engendra nuevas leyes, nuevas relaciones sociales y nuevas técnicas, como es el caso cuando se concluye que está prohibido (dominio moral) empujar a otra persona (dominio de actos motores) intencionadamente (dominio de la psicología) ante un tren en marcha (dominio de los objetos) para salvar la vida (dominio moral) a otras cinco (dominio numérico).

En mi lista de propiedades definitorias, la tercera corresponde al uso de símbolos mentales. Tenemos la capacidad de convertir espontáneamente cualquier experiencia sensorial (real o imaginaria) en un símbolo, que podemos conservar para nosotros o manifestar a otros a través del lenguaje, el arte, la música o la codificación informática.

Cuarta: los humanos somos los únicos seres con pensamiento abstracto. A diferencia de los animales, anclados, en buena medida, en experiencias sensoriales o perceptivas, muchos de nuestros pensamientos no tienen una conexión clara con sucesos de ese tipo. Sólo nosotros podemos reflexionar sobre la apariencia de los unicornios o los alienígenas, sobre sustantivos o verbos, sobre el infinito o sobre Dios.

Los antropólogos disienten sobre el momento en que tomó forma la mente humana moderna. Sin embargo, el registro arqueológico indica que debió acontecer una transformación importante durante un período breve de la historia evolutiva, transformación que dio comienzo hace unos 800.000 años en la era paleolítica y se aceleró hará unos 45.000 o 50.000. Es durante este período del Paleolítico —apenas un instante en términos evolutivos— cuando hallamos por vez primera útiles compuestos, huesos de animales dotados de orificios para convertirlos en instrumentos musicales, enterramientos ornamentados que sugieren la posesión de ideas estéticas y creencias en una vida ultraterrena, pinturas rupestres de rica simbología que captan con exquisito detalle sucesos del pasado y del futuro percibido, y el dominio del fuego, técnica que combina los conocimientos populares de física y psicología y que les permitió a nuestros antepasados sobrevivir en ambientes nuevos, al proporcionarles calor y permitirles, mediante la cocción, tornar comestibles nuevos alimentos.

Esos remanentes de nuestro pasado constituyen magníficos recordatorios de lo mucho que hubieron de esforzarse nuestros antepasados para resolver problemas ambientales desconocidos hasta entonces y para expresarse de formas nuevas y originales, señales características de su identidad cultural.

Sin embargo, los restos arqueológicos guardarán eterno silencio sobre los orígenes y las presiones selectivas que desembocaron en los cuatro ingredientes que integran nuestra humanicidad, la singularidad del ser humano.

Las preciosas pinturas rupestres de Lascaux hacen ver que nuestros antepasados comprendían la doble naturaleza de sus pinturas: son objetos que, a su vez, se refieren a objetos y a sucesos. Mas no revelan si esos pintores y sus admiradores expresaban sus preferencias estéticas sobre esas obras de arte mediante símbolos organizados en clases gramaticales (sustantivos, verbos, adjetivos) o si imaginaron que esas ideas podían ser comunicadas

INGREDIENTES DE LA MENTE HUMANA

Los cuatro rasgos siguientes distinguen la mente humana de las mentes animales. Para revelar el origen de la mente humana será necesario explicar el modo en que surgieron estas propiedades excepcionales.

La computación generativa faculta a los humanos para crear una variedad prácticamente ilimitada de palabras, conceptos y cosas. Esta facultad comprende operaciones de dos tipos: recursivas y combinatorias. La recurrencia consiste en aplicar repetidamente una regla para crear expresiones nuevas. La operación combinatoria consiste en conjuntar elementos discretos para engendrar ideas nuevas.

La combinación promiscua de ideas permite la mezcolanza de dominios de conocimiento (arte, sexo, espacio, causalidad y amistad, por ejemplo) para generar leyes, relaciones sociales y técnicas nuevas.

Los símbolos mentales codifican experiencias sensoriales, reales e imaginadas, que forman la base de un sistema de comunicación rico y complejo. Tales símbolos pueden ser para uno mismo o manifestados a otros mediante palabras o imágenes.

El pensamiento abstracto permite trascender de lo visible, audible, tangible u odorable.

El autor

Marc Hauser es profesor de psicología, biología evolutiva humana y biología de organismos y evolutiva en la Universidad de Harvard. Estudia los fundamentos del desarrollo y la evolución de la mente humana; intenta determinar las facultades mentales exclusivas de los humanos y las que compartimos con otros animales.





1. LA COMPUTACION GENERATIVA, algo que los humanos realizan pero no otros animales, se refleja en el uso de herramientas. Otras criaturas se valen de útiles, pero los fabrican de un solo material y para una finalidad exclusiva; el hombre, en cambio, combina sin dificultad diversos materiales para crear sus útiles, que a menudo emplea para varios fines. El orangután se sirve de una hoja para cubrirse; los humanos utilizamos un simple lápiz, que está hecho de varios materiales, para más de un fin.

J.H. PETE CARMICHAEL *Getty Images (orangután)*; PATRICK LANE *Somos Images/Corbis (lápiz para escribir)*; WILLIAM WHITEHURST *Corbis (punto de libro)*; ALIN DRAGULIN *Getty Images/Vico Collective (lápiz para borrar)*; BRAD WILSON *Getty Images (moño)*

igualmente bien por medio de sonidos o de signos, dependiendo de la salud de sus sistemas sensoriales.

Análogamente, tampoco los instrumentos más antiguos que se han hallado (flautas de hueso y marfil de hace 35.000 años) nos cuentan historia alguna sobre su uso, ni nos dicen si se tocaron en ellos unas pocas notas, repetidamente, al estilo de Philip Glass, o si el compositor concibió, como Wagner, la inclusión recursiva de unos temas en otros.

Lo que sí podemos afirmar con absoluta confianza es que todos los humanos, desde los cazadores-recolectores de la sabana africana hasta los financieros de Wall Street, poseen al nacer los cuatro ingredientes de humanicidad. No obstante, las formas de agregar esos cuatro ingredientes en las recetas para la creación cultural sí varían considerablemente de un grupo a otro. Las culturas humanas pueden diferir en idioma, composiciones musicales, normas morales o artefactos. Desde el punto de vista de una cultura, las prácticas ajenas nos resultan, a menudo, extravagantes, a veces, repulsivas, con frecuencia incomprensibles y, en ocasiones, inmorales. Ningún otro animal despliega tan amplia gama en sus estilos de vida. Mirado así, un chimpancé es, culturalmente, un cero a la izquierda.

Los chimpancés y otros animales siguen poseyendo, empero, interés e importancia para comprender los orígenes de la mente humana. De hecho, únicamente tras esclarecer cuáles son las capacidades que compartimos con otros animales y cuáles las exclusivamente nuestras podrá la ciencia ensamblar la narración de cómo ha adquirido su ser nuestra humana singularidad.

Mentes hermosas

Cuando Sofía, mi hija pequeña, tenía tres años, le pregunté qué es lo que nos hace pensar. Ella se señaló la cabeza y dijo: "Mi cerebro". Le pregunté entonces si otros animales tenían cerebro, empezando con perros y monos y siguiendo con aves y peces. Sofía dijo que sí. Cuando le pregunté lo mismo de una hormiga que corría ante nosotros, ella dijo: "No. Demasiado pequeña". Los adultos sabemos que el tamaño no es criterio infalible para determinar si un animal posee cerebro o no, pero sí afecta a ciertos aspectos estructurales del cerebro y, por consiguiente, a ciertos aspectos del pensamiento.

Se ha comprobado en diversas investigaciones que la mayoría de los tipos de células cerebrales, junto con sus mensajeros químicos, son los mismos en todas las especies de vertebrados, incluido el hombre. Además, la organización general de las estructuras de la corteza cerebral es, en buena medida, la misma en monos, simios y humanos. Dicho de otro modo: los humanos comparten un buen número de rasgos cerebrales con otras especies. Las diferencias residen en el tamaño relativo de determinadas regiones de la corteza y en la forma en que éstas se interconectan. Esas diferencias dan vida a pensamientos sin parangón en el resto del reino animal.

Los animales sí exhiben comportamientos complejos, presagio, al parecer, de algunas de nuestras facultades. Tomemos, por ejemplo, la capacidad de creación o modificación de objetos para un fin determinado. Para atraer a las hembras, los pájaros jardineros machos construyen con ramitas magníficas estructuras arquitectónicas que decoran con plumas, hojas y yemas de vegetales, y que pintan con moras aplastadas. Los cuervos de Nueva Caledonia tallan largas hojas herbáceas hasta convertirlas en una especie de cañas para "pescar" insectos. Se ha visto a chimpancés servirse de palos aguzados para hacerse brochetas con gálagos acurrucados en las grietas y recovecos de los árboles.

Asimismo, en estudios experimentales efectuados con varios animales se han observado unos conocimientos innatos sobre física que les permiten generalizar, trascender de sus experiencias inmediatas y crear soluciones originales al serles planteadas en el laboratorio situaciones problemáticas. En uno de tales experimentos, les fueron presentados a orangutanes y chimpancés unos cilindros de plástico estrechos que no era posible mover, con un cacahuete en el fondo. Los animales consiguieron hacerse con la inaccesible golosina sorbiendo agua y escupiéndola dentro del cilindro, para que el cacahuete flotase hasta la superficie.

Los animales exhiben también conductas sociales en común con los humanos. Las hormigas más sabias informan a sus pupilas más novatas, guiándolas hasta fuentes de alimento. Los suricatos (una especie de mangostas del Kalahari) dan lecciones a sus cachorritos, enseñándoles a desmembrar deliciosos, aunque letales, escorpiones. Una serie de estudios han demostrado que animales tan diversos como los perros domésticos, los monos capuchinos y los chimpancés se rebelan cuando son tratados de forma desigual al repartirles alimentos y exhiben lo que los economistas llaman "aversión a la desigualdad".

Más todavía, está demostrado que los animales no se estancan en las rutinas cotidianas, sean de mantenimiento de su posición social, del cuidado de las crías o de búsqueda de nuevos compañeros o aliados. Por el contrario, responden con rapidez a situaciones sociales nuevas, caso de un animal subordinado que se gana el favor de machos más poderosos porque posee una cierta habilidad excepcional.

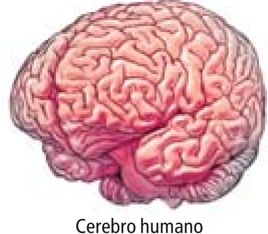
Esas observaciones inspiran un sentimiento de admiración ante la belleza de las soluciones de I + D que ofrece la naturaleza. Pero en cuanto superamos este estremecimiento, hemos de asomarnos al abismo que separa a los humanos de las demás especies, un espacio cavernoso, como informaron los extraterrestres. Para explicar mejor la profundidad de ese tajo y la dificultad de descifrar cómo surgió, permítaseme describir con mayor detalle nuestra humana singularidad.



ANDREW SWIFT



Cerebro de la ballena asesina
5620 gramos



Cerebro humano
1350 gramos

Cerebro de la musaraña etrusca
0,1 gramos

TAMAÑOS CEREBRALES

Los humanos son más inteligentes que otras criaturas dotadas de cerebro mayor, sea en términos absolutos, como el de la ballena asesina, o relativos (respecto a la masa corporal) como el de la musaraña. El tamaño no explica, por sí solo, la singularidad de la mente humana.

Comunicación y lenguaje

Uno de nuestros útiles más elementales, el lápiz del n.º 2, el que se usa para cumplimentar un test, ilustra la excepcional libertad de la mente humana en comparación con el limitado alcance de la cognición animal. Sostenemos el lápiz por la madera pintada, escribimos con la mina y borramos con la goma rosada del otro extremo, sujeta por un anillo de metal. Cuatro materiales, cada uno con una función, unidos en un objeto. Aunque ese útil fue concebido para escribir, puede servir para sujetar el pelo en un moño, señalar una página o para librarnos de un insecto molesto. Los útiles de los animales, en cambio (como los palitos que utilizan los chimpancés para pescar termitas en los hormigueros), están compuestos de un solo material, fueron diseñados para una función y nunca se usan para otras. No poseen las propiedades combinatorias del lápiz.

Tenemos en acción a la recurrencia en otro sencillo instrumento, el vaso telescópico, retráctil, que encontramos en el equipo de tantos campistas. Para realizar este dispositivo, el fabricante necesita programar sólo una sencilla regla: añadir al último segmento un aro de diámetro algo mayor y repetir el procedimiento hasta que se obtenga el tamaño de vaso deseado. Los humanos nos valemos de operaciones recursivas como ésta en prácticamente todos los aspectos de la vida mental: desde el lenguaje, la música o las matemáticas hasta la generación de una gama ilimitada de





2. LOS ANIMALES PUEDEN RECURRIR a un conjunto de manifestaciones simples para representar objetos y acontecimientos del presente, pero su gama expresiva es muy reducida en comparación con la del hombre, cuya facultad de pensamiento le permite hablar no sólo del pasado o del futuro, sino también expresar conceptos abstractos, como las enseñanzas espirituales del Dalai Lama.

ART WOLFE *Getty Images* (*león*); REUTERS/CORBIS (*Dalai Lama*)

movimientos con las piernas, manos o boca. En cambio, los únicos atisbos de recurrencia que apreciamos en los animales proceden de la observación de su sistema motor en acción.

Todas las criaturas están dotadas de maquinaria motora recursiva, integrada en su equipamiento operativo estándar. Para andar, sitúan una mano o pata delante de otra, y así una y otra y otra vez. Para alimentarse, pueden asir un objeto y llevárselo repetidamente a la boca, hasta que su estómago les comunica que ya están saciados. En las mentes animales, ese sistema recursivo se encuentra encerrado bajo llave en las regiones motoras del cerebro; es inaccesible para otras regiones cerebrales. Su existencia lleva a pensar que una etapa crítica en la adquisición de nuestra peculiar forma de pensamiento no fue que la recurrencia evolucionase hasta convertirse en una nueva forma de computación, sino la liberación de la recurrencia de su prisión motora, dejándola acceder a otros dominios de pensamiento. La forma en que la recurrencia se liberó de esa restringida función está vinculada con uno de nuestros otros ingredientes (la promiscuidad de interfases), al que me referiré a no tardar.

El hiato entre mentes se amplía cuando comparamos el lenguaje humano con la comunicación en otras especies. El hombre, al igual que otros animales, dispone de un sistema de comunicación no verbal que transmite emociones y deseos (las risas y los chillidos de los niños pequeños se encuadran en tal sistema). Pero sólo el hombre posee un sistema de comunicación lingüística basado en la manipulación de símbolos mentales, en el que cada símbolo está encuadrado en una categoría abstracta y específica, como sustantivo, verbo o adjetivo.

Aunque algunos animales disponen de sonidos que parecen representar algo más que emociones y transmiten información relativa a objetos o sucesos como la alimentación, el sexo o la depredación, la gama de tales sonidos es mínima en comparación con la nuestra; además, ninguno de ellos puede encuadrarse en las categorías abstractas que estructuran nuestras expresiones lingüísticas.

Tal aserto exige explicación, pues suele suscitar un extremado escepticismo. Se podría pensar, por ejemplo, que los vocabularios animales parecen mínimos porque los investigadores que estudian la comunicación entre animales no comprenden en realidad de qué hablan éstos. Aunque los científicos tengan mucho que aprender sobre vocalizaciones y, en general, más sobre comunicación, considero que la insuficiencia de sus estudios no explica la amplitud del hiato. La mayoría de los intercambios sonoros entre animales consisten en lanzar gruñidos, arrullos o chillidos, con una única volea de vuelta. Es posible que los animales empaqueten una vasta cantidad de información en un gruñido de 500 milisegundos; algo así como "por favor, despúlgame ahora la parte baja del lomo, que yo te lo haré después". Pero en tal caso, ¿por qué habremos desarrollado los humanos un sistema tan arcano y verboso, si hubiéramos podido resolverlo todo con un gruñido o dos?

Además, incluso concediendo que la "danza del vientre" de las abejas melíferas constituya una representación simbólica de un delicioso polen situado a un kilómetro en dirección norte y los avisos de alarma del cercopiteco de nariz blanca representen simbólicamente a distintos depredadores, tales formas simbólicas se diferencian de las nuestras en cinco aspectos





3. MAS QUE MATEMATICAS. Muchas especies animales tienen la capacidad de contar. Pero sólo el hombre puede calcular la circunferencia de la Tierra, la velocidad de la luz o la probabilidad de ganar en la lotería. Puede, además, combinar su sistema numérico con varios otros dominios de pensamiento, como el de la moral, para decidir si salvar a cinco personas o a una, por ejemplo.

fundamentales: son provocadas sólo por objetos o acontecimientos reales, nunca por entes imaginados; se restringen al presente; no forman parte de un esquema de clasificación más completo, como los que organizan nuestras palabras en sustantivos, verbos o adjetivos; raramente se usan en combinación con otros símbolos y, cuando lo son, las combinaciones se limitan a secuencias de dos, sin reglas; y están asociados de forma fija a acontecimientos concretos.

El lenguaje humano es, además, notable —y enteramente distinto de los sistemas de comunicación de otros animales— por otro concepto: funciona igual de bien en las modalidades visual y auditiva. Si un ave perdiera el canto o una abeja la vibración de su abdomen, cesaría su capacidad de comunicación. Pero si un humano es sordo, dispone, por el lenguaje de signos, de una vía de comunicación igualmente expresiva, pareja, en complejidad estructural, a la vía acústica.

Nuestros saberes lingüísticos, junto con los cómputos que requieren, interactúan también en formas fascinantes con otros dominios de conocimiento que resaltan poderosamente nuestras excepcionales facultades para establecer conexiones promiscuas entre sistemas de conocimiento. Tomemos, por ejemplo, la capacidad para cuantificar objetos y sucesos, algo que compartimos con otros animales. Existe un amplio muestrario de especies que poseen al menos dos facultades no lingüísticas para el recuento. Una de ellas es exacta, pero limitada a números menores que cuatro. La otra es de alcance ilimitado, pero es aproximada y se limita a ciertas ratios para la discriminación; un animal que puede discriminar uno de dos, por ejemplo, puede discernir también dos de cuatro, o 16 de 32, y así sucesivamente. El primer sistema está anclado en una región cerebral que interviene en el rastreo de individuos; el segundo se ubica en regiones cerebrales que computan magnitudes.

El año pasado, mis colaboradores y yo identificamos un tercer sistema de recuento en monos rhesus, sistema que puede ayudarnos a comprender los orígenes de la capacidad humana para establecer la diferencia entre singular y plural. Este sistema opera cuando los individuos ven conjuntos de objetos que les son presentados al mismo tiempo, a diferencia de la presentación secuencial de individuos; provoca que los monos rhesus discriminen uno de muchos (pero no muchos de muchos) ítems de alimento. En nuestro experimento, le mostramos a un mono rhesus una manzana y la guardamos en una caja. Después le presentamos al mismo mono cinco manzanas y las guardamos todas a la vez en una segunda caja. Cuando se le daba la oportunidad de elegir, el mono seleccionaba de forma sistemática la segunda caja, la que contenía cinco manzanas. Después pusimos dos manzanas en una caja y cinco en la otra. El mono, esta vez, no mostró una preferencia sistemática. Los humanos hacemos esencialmente lo mismo cuando decimos "una manzana" o "dos, cinco o 100 manzanas".

Pero cuando el sistema lingüístico humano conecta con ese sistema conceptual más arcaico acontece algo peculiar. Para verlo, realice el ejercicio siguiente: añada a los números 0, 0,2 y –5 la palabra "manzana" o "manzanas", la que juzgue más adecuada. Si usted es como casi todos los hispanohablantes nativos, incluidos niños de pocos años, habrá optado por "manzanas". De hecho, también habría selec-

TIM FLACH *Getty Images* (*izquierda*); RICHARD SCHULTZ *Corbis* (*derecha*)

cionado "manzanas" si la unidad viniera con decimales "1,0". ¿Sorprendido? Normal. No se trata de una regla que hayamos aprendido en la escuela; desde el punto de vista gramatical, pudiera no ser correcta. Sin embargo, forma parte de la gramática universal con la que sólo nosotros estamos dotados al nacer. Se trata de una regla sencilla, pero abstracta: todo lo que no sea "1" corresponde a un plural.

El ejemplo de las manzanas demuestra que sistemas distintos (la sintaxis y los conceptos de colección) interactúan y producen nuevas formas de pensar el mundo o de conceptualizarlo. Pero en humanos, el proceso creativo no se detiene ahí. Aplicamos nuestros sistemas numéricos y lingüísticos también a problemas morales (es preferible salvarle la vida a cinco personas que a una sola), a la economía (si dono 10 € a los demás, pero a usted le ofrezco sólo 1 €, le parecerá injusto y lo rechazará) y a negocios prohibidos por tabúes (en nuestro país, la venta de hijos es inaceptable, aunque sea por mucho dinero).

Pensamientos extrahumanos

Idéntica observación vale, ya se trate de los pedagógicos suricatos o de monos con aversión a la desigualdad: cada uno de estos animales ha desarrollado evolutivamente una mente exquisita, adaptada a problemas singulares y, en consecuencia, limitada cuando se trata de aplicar destrezas a problemas de nuevo tipo. No es el caso del bípedo implume. Una vez instalada y en servicio, la mente moderna les permitió a nuestros antepasados la exploración de regiones deshabitadas, la creación de lenguajes para describir acontecimientos nuevos y la consideración de una vida ultraterrena.

Las raíces de nuestras facultades cognitivas siguen siendo en gran medida desconocidas, pero una vez detectados los ingredientes singulares de la mente humana, sabemos ahora lo que se ha de buscar. Confío en que la neurobiología arrojará luz a tal fin. Aunque no se comprenda todavía cómo se construye el cerebro a partir de los genes ni cómo se traduce la actividad eléctrica cerebral en pensamientos y emociones, estamos presenciando una revolución en las neurociencias que irá colmando esos vacíos y enriquecerá nuestra comprensión de las profundas diferencias entre el cerebro humano y el de otras criaturas.

Los estudios de animales quiméricos, basados en el trasplante de los circuitos cerebrales de un individuo de una especie a otro individuo de otra especie, están contribuyendo a revelar las interconexiones cerebrales. Y los experimentos con animales transgénicos están descubriendo genes que desempeñan funciones en el lenguaje y en otros procesos sociales. Tales logros nada dicen sobre el modo en que nuestras neuronas nos proporcionan facultades mentales excepcionales, pero sí nos facilitan una guía para una exploración más completa de dichas cualidades.

Por ahora, apenas nos queda otra opción que admitir que nuestra mente es muy distinta de la de los primates, incluso de los más cercanos, y que ignoramos cómo llegó a producirse tal diferencia. ¿Podría un chimpancé idear un experimento para poner a prueba a los humanos? ¿Podría un chimpancé imaginar nuestra resolución de uno de sus problemas? No y no. Aunque los chimpancés puedan ver lo que hacemos, no pueden imaginar lo que pensamos o sentimos, porque carecen de la maquinaria mental requerida.

Aunque los chimpancés y otros animales parecen desarrollar planes y tener en cuenta las experiencias del pasado y sus opciones futuras, no existen pruebas de que consideren situaciones "contrafácticas" (mundos imposibles), cosa que los humanos hacemos sin cesar y que hemos hecho desde que nuestro peculiar genoma dio nacimiento a nuestras excepcionales mentes. Nuestros sistemas morales tienen como premisa tal capacidad mental.

¿Habrán llegado nuestras mentes, tan excepcionales, a alcanzar la máxima potencia que una mente pueda poseer? Sospecho que cualquiera que sea la forma de expresión humana que se considere (lenguajes, composiciones musicales, normas morales o formas tecnológicas) seremos incapaces de agotar el espacio de todas las posibilidades. Nuestra capacidad para imaginar alternativas sufre limitaciones notables.

Si nuestra mente se enfrenta a restricciones inherentes a lo que está capacitada para concebir, la noción de "pensar fuera de la caja" es totalmente errónea. Estamos siempre "dentro de la caja", limitados en nuestra capacidad para contemplar otras posibilidades. Y así, al igual que los chimpancés no pueden imaginar en qué consiste ser humano, los humanos no pueden imaginar a qué se asemejaría un extraterrestre inteligente. No importa cómo lo intentemos: estamos atrapados dentro de esa caja que hemos dado en llamar mente humana. La única forma de salir de ella sería por evolución, por una remodelación revolucionaria de nuestro genoma y de su potencial para esculpir nuevas conexiones y modelar nuevas estructuras neuronales. Un cambio tal daría nacimiento a una mente de nuevo cuño, que contemplaría a sus antepasados como a menudo hacemos nosotros con los nuestros: con respeto, curiosidad y la sensación de que nos encontramos solos, de que somos la piedra filosofal en un mundo de mentes simples.

ESCULTURA EN MARFIL DE UN AVE ▲

INDICIOS INSUFICIENTES

El registro arqueológico revela que los humanos solían crear objetos de arte e instrumentos musicales hace unos 35.000 años, señal de que poseían pensamiento simbólico. Ahora bien, los arqueólogos no tienen forma de saber lo que pensaban nuestros antepasados sobre los símbolos que dejaron en pos, ni si compusieron su música. Tales artefactos poseen sólo una utilidad limitada para ensamblar los orígenes de nuestras singulares facultades mentales.


FLAUTA TALLADA EN HUESO DE AVE ▼

HILDE JENSEN *AP Photo/Universidad de Tübingen/Nature magazine (escultura de pájaro)*; DANIEL MAURER *AP Photo (flauta de hueso)*

Bibliografía complementaria

THE FACULTY OF LANGUAGE: WHAT IS IT, WHO HAS IT, AND HOW DID IT EVOLVE? Marc D. Hauser, Noam Chomsky y W. Tecumseh Fitch en *Science*, vol. 298, págs. 1569-1579; 22 de noviembre, 2002.

MORAL MINDS: HOW NATURE DESIGNED OUR UNIVERSAL SENSE OF WRIGHT AND WRONG. Marc D. Hauser. Harper Collins, 2006.

BABOON METAPHYSICS: THE EVOLUTION OF A SOCIAL MIND. Dorothy L. Cheney y Robert M. Seyfarth. University of Chicago Press, 2007.

EL ORIGEN DE LA CULTURA HUMANA

ZENOBIA JACOBS Y RICHARD G. ROBERTS

Durante la Edad de Piedra Media, en el sur de Africa, los humanos vivieron dos episodios de innovación espectacular que podrían guardar relación con un crecimiento demográfico y con el inicio de la migración fuera del continente

CONCEPTOS BASICOS

- Restos hallados en el sur de Africa demuestran que durante la Edad de Piedra Media se produjeron dos explosiones de innovación técnica y conductual. Nuestra cultura hunde, pues, sus raíces en épocas más remotas de lo que se pensaba.
- La datación mediante luminiscencia estimulada ópticamente, una técnica de gran precisión, arroja luz sobre la duración de esas industrias líticas efímeras, así como sobre las razones de su origen y desaparición.
- Estudios paleoclimáticos y genéticos sugieren que la cronología de esos destellos de ingenio humano podría guardar relación con los cambios ambientales, la historia demográfica y el tejido social de nuestros antepasados cazadores-recolectores.

La cueva de Blombos es un abrigo de pequeñas dimensiones, incluso para los parámetros arqueológicos. Sin embargo, los artefactos recuperados en apenas trece metros cúbicos de sedimentos han transformado nuestras ideas sobre el momento en que nuestra especie adquirió los atributos de conducta que solemos asociar a los humanos "modernos". En esa pequeña cavidad situada en un acantilado de arenisca cerca de Ciudad del Cabo, Christopher Henshilwood y sus colaboradores, de la Universidad de Bergen, hallaron registros de expresión simbólica en forma de motivos abstractos (fragmentos grabados de ocre) y ornamentos personales (cuentas de concha) de al menos 70.000 años de antigüedad, es decir, más de 35.000 años anteriores a la aparición de algo semejante en Europa.

Cuando se difundieron esos descubrimientos, a principios de este decenio, su repercusión fue extraordinaria y provocativa, pues rebatían la imagen tradicional sobre la antigüedad y el lugar donde surgió el comportamiento simbólico, un rasgo único de *Homo sapiens* [véase "La aparición de la mente moderna", Kate Wong, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto 2005].

Según diversos fósiles humanos hallados en Etiopía, nuestros rasgos anatómicamente modernos se remontan al menos hasta hace 200.000 años; pero la aparición de la mente moderna fue 100.000 años posterior. Los hallazgos de Blombos plantearon diversas preguntas interesantes. ¿Qué causó ese acontecimiento clave en la Prehistoria humana? ¿Cuál fue su extensión geográfica? ¿Ocurrió de forma simultánea en algún otro lugar del Africa subsahariana? ¿Qué relación tuvieron esas innovaciones —si es que tuvieron alguna— con las primeras dispersiones de nuestra especie?

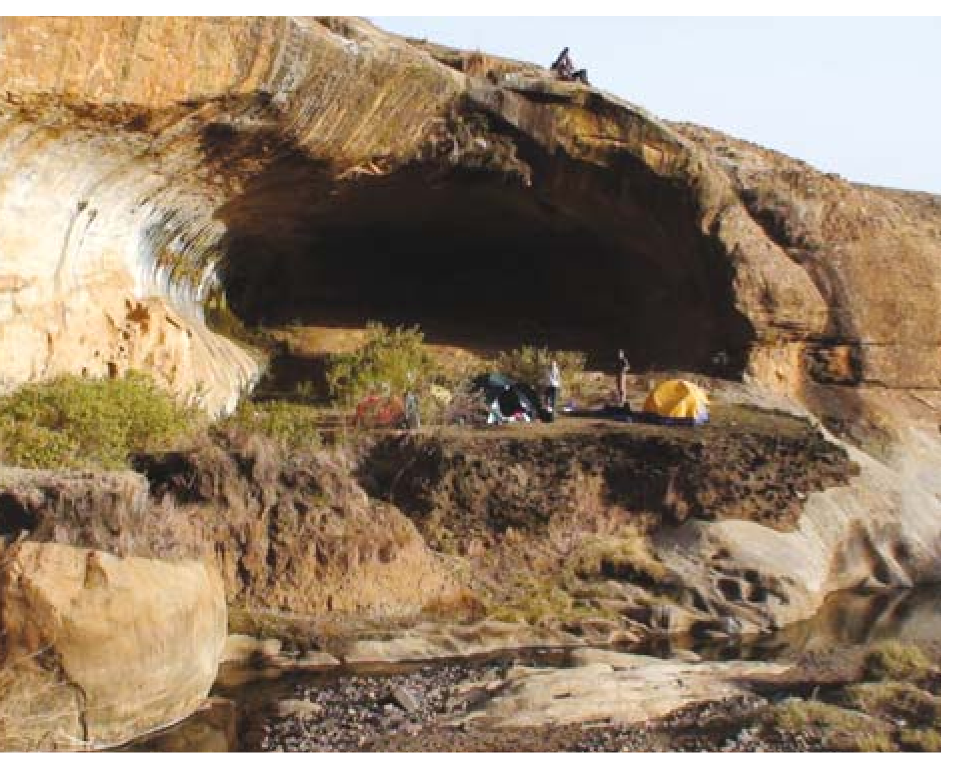
El conjunto de útiles líticos que acompañaba a los fragmentos grabados de ocre y las conchas perforadas de Blombos arroja luz sobre tales cuestiones. Las herramientas de piedra suelen aparecer en todos los yacimientos arqueológicos porque se conservan mucho mejor que los restos animales o vegetales. Los arqueólogos prestan particular atención al modo en que estos útiles fueron fabricados y utilizados. Amén de los famosos ocres y cuentas, los niveles de la Edad de Piedra Media de Blombos contienen un importante conjunto de útiles líticos conocidos como puntas de Still Bay (población en la que se encuentran los acantilados). Esas puntas estrechas de forma lanceolada están talladas por ambos lados y probablemente formaban parte de una punta de lanza. Sir Langham Dale las descubrió en 1866 cerca de Ciudad del Cabo; fueron uno de

1. PUNTAS DE LANZA halladas en la cueva de Blombos. Pertenecen a la industria lítica de Still Bay. Su diseño, de la Edad de Piedra Media, muestra un gran refinamiento técnico.

CORTESIA DE CHRIS HENSHILWOOD









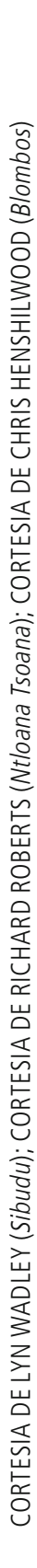
los primeros tipos de industria lítica descritos en Sudáfrica. A. J. H. Goodwin, padre de la arqueología sudafricana, fue el primero en apreciar el refinamiento técnico de dichas herramientas.

En la actualidad, la industria lítica de Still Bay se considera una fase técnica precoz e innovadora de la Edad de Piedra Media, que fue precedida por 200.000 años de una industria lítica menos elaborada. Luego, se produjo otro episodio de innovación técnica, la industria de Howieson's Poort, que produjo cuchillos alargados y tallados sólo en un filo y que se fijaban a un mango de madera para formar un arma compuesta. Ambas industrias, Still Bay y Howieson's Poort, desaparecieron. En el registro arqueológico no vuelve a aparecer una técnica tan compleja hasta la Edad de Piedra Tardía en Africa y el Paleolítico Superior en Europa, decenas de miles de años más tarde.

La importancia de las industrias de Still Bay y Howieson's Poort no reside sólo en su técnica más elaborada y en lo que parecen ser instrumentos de caza, sino también en su asociación con artefactos, que indican nuevas conductas. En este grupo se incluyen los hallazgos de Blombos en el sur, los ocres grabados de Klein Kliphuis y las cáscaras de huevos de avestruz decoradas de Diepkloof al oeste, y las puntas de hueso y cuentas de concha en Sibudu al este. Se trata de vestigios de un avance cognitivo en los humanos. De su observación se infiere que un aumento en la complejidad de la organización técnica y social coincidió con una explosión demográfica (crecimiento de las poblaciones e incremento en la densidad de los asentamientos en Africa).

También se han descubierto técnicas líticas de una complejidad similar en el norte de Africa —el ejemplo más destacable corresponde a las puntas de proyectil bifaces de la industria Ateriense halladas a lo largo del Magreb— y posiblemente en Africa oriental,

2. LAS POBLACIONES DE CAZADORES-RECOLECTORES que vivieron durante la Edad de Piedra Media dejaron tras de sí útiles líticos en varios abrigos rocosos y cuevas del sur de Africa. La cueva de Sibudu (*arriba*) se halla a 40 kilómetros al norte de Durban. El abrigo de Ntloana Tsoana (*centro*), en la ribera sur del río Phuthiatsana, en Lesotho. La cueva de Blombos (*abajo*) se encuentra a 300 kilómetros al este de Ciudad del Cabo. Se han hallado en esos yacimientos indicios de comportamientos "modernos", los cuales se pensaba que habían aparecido mucho más tarde en Europa. Dataciones más precisas han arrojado luz sobre los factores que podrían haber favorecido el origen del comportamiento humano moderno.





donde se sospecha que se encuentra el punto de partida de las migraciones humanas fuera del continente. En ocasiones se han encontrado también ornamentos personales en esos yacimientos: cuentas elaboradas con cáscaras de huevo de avestruz y gasterópodos marinos perforados.

Los intentos por relacionar cronológicamente las innovaciones técnicas y de comportamiento expuestas con las acontecidas en el sur de Africa no han resultado fructíferos debido a la falta de precisión de las dataciones correspondientes. En consecuencia, ha sido difícil establecer la fecha y el lugar de aparición del comportamiento humano moderno, así como conocer la causa por la que nuestros antepasados se hicieron "humanos" y las consecuencias inmediatas de ello. Para resolver ese rompecabezas se necesitan dataciones más precisas de los yacimientos más importantes a lo largo del continente.

En nuestro caso, iniciamos un proyecto de dataciones sistemáticas en varios yacimientos sudafricanos. Los resultados indican que el incremento de la población en Africa pudo desempeñar una función clave como detonante de los cambios en la industria lítica y, quizás, influyó en las emigraciones fuera del continente que se produjeron hace unos 60.000 años.

Bruma cronológica

En las dataciones de acontecimientos y objetos arqueológicos nos enfrentamos a menudo con el mismo problema: las edades estimadas, múltiples e independientes, presentan mayor dispersión de la que esperaríamos basados en la variación estadística normal (incluido el margen de error de cada datación). Buena parte de esa extraordinaria variación corresponde a un artefacto del análisis, una consecuencia inevitable de la distinta naturaleza de los materiales datados, métodos de datación, patrones de calibración, procedimientos de medición y técnicas de análisis. Surge idéntica dificultad cuando un conjunto de muestras (o una sola muestra) del mismo yacimiento se data mediante la misma técnica, aunque en laboratorios distintos. A menos que las condiciones experimentales, especificaciones de los instrumentos, calibración y programas de análisis sean idénticos, lo más probable es que sigamos obteniendo una variación adicional. A ese problema de las dataciones lo hemos denominado "bruma cronológica", porque no nos permite conocer con exactitud la antigüedad de las muestras o los episodios.

Se han realizado numerosos intentos, mediante métodos de datación relativos y absolutos (numéricos), de establecer el momento en que se originaron y desaparecieron las industrias de Still Bay y de Howieson's Poort. Los métodos numéricos proporcionan un valor estimado que se sitúa en una escala temporal estándar, expresada a través de años de antigüedad o años antes del presente. Los métodos relativos arrojan secuencias de sucesos ordenados entre sí de forma relativa, si bien precisan calibrarse mediante alguna datación absoluta para poder situarlos en una escala temporal.

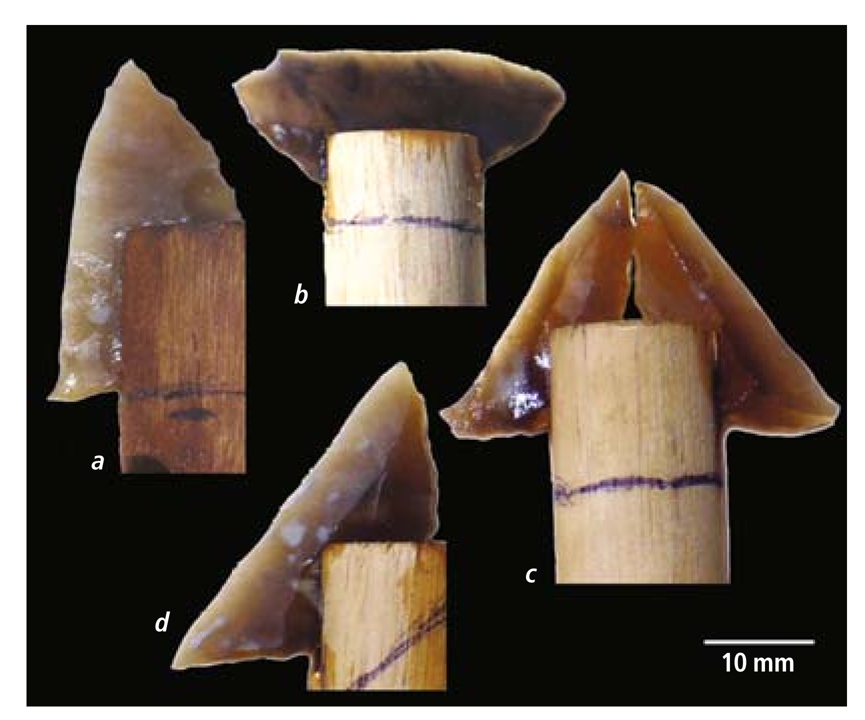
La primera técnica absoluta desarrollada y la más conocida es la datación radiocarbónica (por carbono-14); en circunstancias ideales, establece cuánto hace que murió una planta o un animal y tiene un límite máximo de datación de 60.000 años. Sin embargo, en la práctica la contaminación de las muestras dificulta la obtención de fechas fiables más allá de los 30.000 años. Por ello, se utilizan métodos numéricos alternativos para muestras

3. EN LA CUEVA DE BLOMBOS, Chris Henshilwood y su equipo han descubierto restos de hace 72.000 años con unas características técnicas y simbólicas que se asumían que habían surgido en Europa hace unos 35.000 años: entre otros, un fragmento de ocre (óxido de hierro natural de color rojo que los pueblos cazadores recolectores utilizan en la actualidad como pintura corporal, *izquierda*) grabado y conchas de caracol transformadas en cuentas (*derecha*).

CORTESIA DE CHRIS HENSHILWOOD

AFRICA DEL SUR

Edad de Piedra Temprana	Edad de Piedra Media	Edad de Piedra Tardía
2,5 millones de años ~180.000 años de antigüedad	180.000 años ~22.000 años de antigüedad	22.000 años ~1500 años de antigüedad



4. PARA CONOCER EL MODO EN QUE LAS POBLACIONES de la Edad de Piedra Media podrían haber empleado los útiles de Howieson's Poort, los arqueólogos han reproducido estas herramientas, las han fijado a mangos de madera y han experimentado su uso en distintas tareas. En la imagen aparecen varias configuraciones de enmangamiento realizadas por Marlize Lombard y Justin Pargeter, de la Universidad del Witwatersrand, en Sudáfrica: (*a*) longitudinal, (*b*) transversal, (*c*) diagonal y (*d*) opuestas.

más antiguas y para las que no son de origen animal o vegetal.

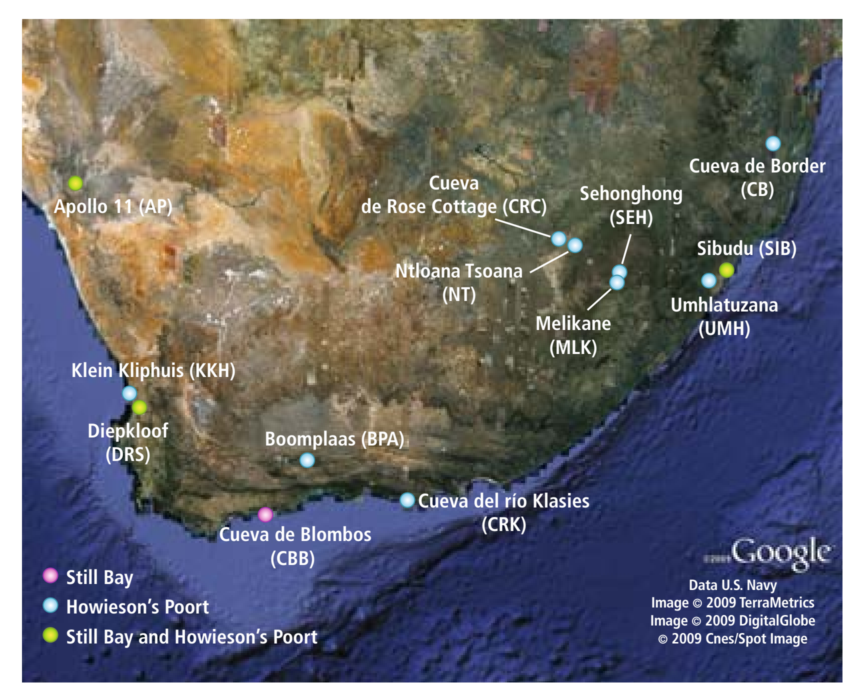
Durante los últimos tres decenios, se han utilizado en los yacimientos sudafricanos, con un éxito desigual, varias técnicas: datación por series de uranio para las formaciones carbonatadas de las cuevas, datación por resonancia de espín electrónico para el esmalte de los dientes, datación por termoluminiscencia para piedras quemadas y luminiscencia estimulada ópticamente para sedimentos arenosos. Se ha recurrido también a la racemización de aminoácidos, un método relativo, para datar un huevo de avestruz. Según los resultados, la industria de Still Bay abarca desde hace 130.000 años hasta 50.000 años de antigüedad, mientras que la industria de Howieson's Poort es algo más joven, desde hace 100.000 años hasta hace 40.000 años. Esas fechas aproximadas han dado lugar a numerosas especulaciones sobre la duración de las industrias líticas y sobre las razones de su origen y desaparición.

Despejando la bruma

En 2006 acometimos nuestro trabajo con el propósito de aclarar la cronología de las industrias de Still Bay y Howieson's Poort. Hemos aplicado un único método de datación, la luminiscencia estimulada ópticamente (OSL, por sus siglas en inglés), al mismo tipo de materiales procedentes de yacimientos clave, mediante el mismo procedimiento y el mismo equipo. La técnica OSL ofrece numerosas ventajas. Permite datar objetos a lo largo de todo la Edad de Piedra Media (desde hace 180.000 a 22.000 años). Con ella obtenemos edades bastante precisas, con un margen de error de, más o menos, un 5 por ciento. Además, si el mismo experto realiza todas las dataciones, aumenta la precisión y la probabilidad de obtener fechas más consistentes.

La OSL se beneficia del hecho que los granos de cuarzo enterrados absorben la energía de las fuentes naturales de radiación iónica que se hallan en el sedimento envolvente (sobre todo del uranio y del torio, el producto de su decaimiento, y del potasio). Una cantidad reducida de esa energía es atrapada en las irregularidades de la estructura cristalina de los granos. Con luz azul o verde se liberan los electrones, que emiten una señal —luminiscencia estimulada ópticamente— detectada mediante un filtro fotomultiplicador. Se obtiene así una estimación de la dosis de radiación absorbida por los granos de cuarzo.

Si medimos también la cantidad de radiación iónica que emite el sedimento entorno

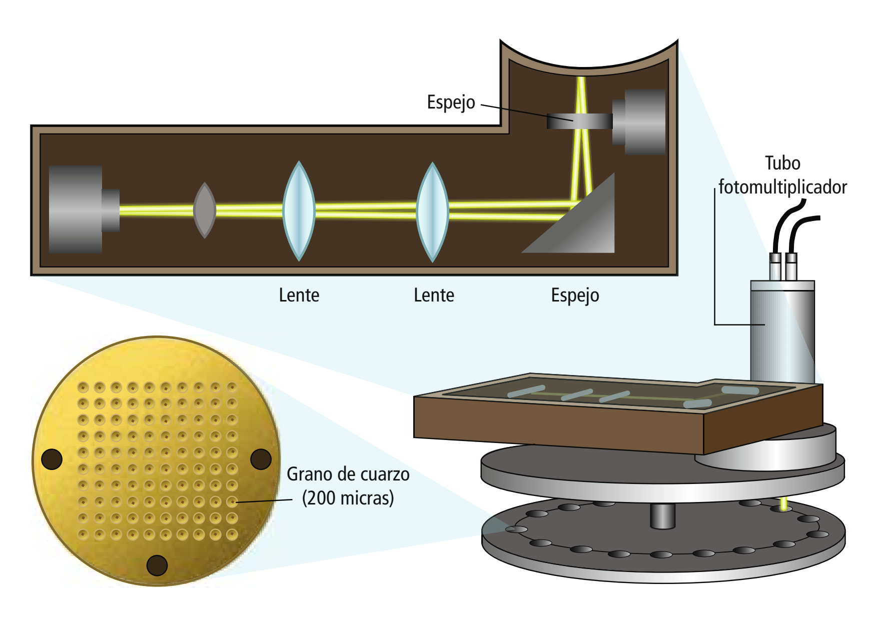


5. PARA ESTABLECER LA CRONOLOGIA de las industrias líticas de Still Bay y Howieson's Poort halladas en el sur de Africa, los autores han datado yacimientos distribuidos en un área de dos millones de kilómetros cuadrados. Han utilizado una técnica que ofrece una gran exactitud y precisión: la datación de granos cuarzo mediante luminiscencia estimulada ópticamente (OSL).

MARLIZE LOMBARD Y JUSTIN PARGETER (*arriba*); STEPHANIE FREESE/GOOGLE (*mapa*)

(dosis de radiación ambiental), podemos calcular cuánto tiempo llevan enterrados los granos de cuarzo y los objetos próximos, se trate de útiles líticos u objetos de adorno corporal.

La técnica de OSL fue desarrollada en 1985 por David Huntley y su equipo, de la Universidad Simon Fraser, para aplicarla sobre todo a la datación de sedimentos geológicos. Pero el método experimentó un sustancial avance en el cambio de milenio, cuando los procedimientos y los equipos de análisis permitieron me dir la pequeña cantidad de radiación (y, por tanto, la antigüedad) que queda almacenada en un grano de apenas 0,1 milímetros de diámetro. Con ello podía medirse, de forma automática, centenares de granos en cada muestra, y obtener, por ende, múltiples dataciones independientes que podían compararse para conocer la consistencia interna de las dataciones y detectar cualquier señal de contaminación.



6. LA DATACION por luminiscencia estimulada ópticamente (OSL) permite determinar la edad de los sedimentos en donde se encuentran los artefactos. Mediante espejos orientables controlados electrónicamente, las lentes dirigen un rayo láser verde a cada uno de los granos de cuarzo, de 200 micras de diámetro. Cada grano se encuentra depositado en uno de los 100 pequeños huecos de un disco. El rayo láser estimula los electrones atrapados en la red cristalina del grano de arena, lo que produce una emisión de luz (la señal OSL) que es detectada por un tubo fotomultiplicador. La energía se va acumulando en esas trampas de electrones desde el momento en que el grano queda enterrado debido a la exposición continua a la radiación iónica de los sedimentos circundantes. A partir de la señal OSL y la radiación de la muestra y el sedimento que la rodeaba, se calcula el tiempo que un grano ha permanecido enterrado.

STEPHANIE FREESE

Para establecer la cronología de las industrias líticas de Still Bay y de Howieson's Poort, una de las autoras (Jacobs) recogió y analizó de forma sistemática todas las muestras, eliminando las diferencias entre yacimientos que afectaban a los trabajos de datación precedentes.

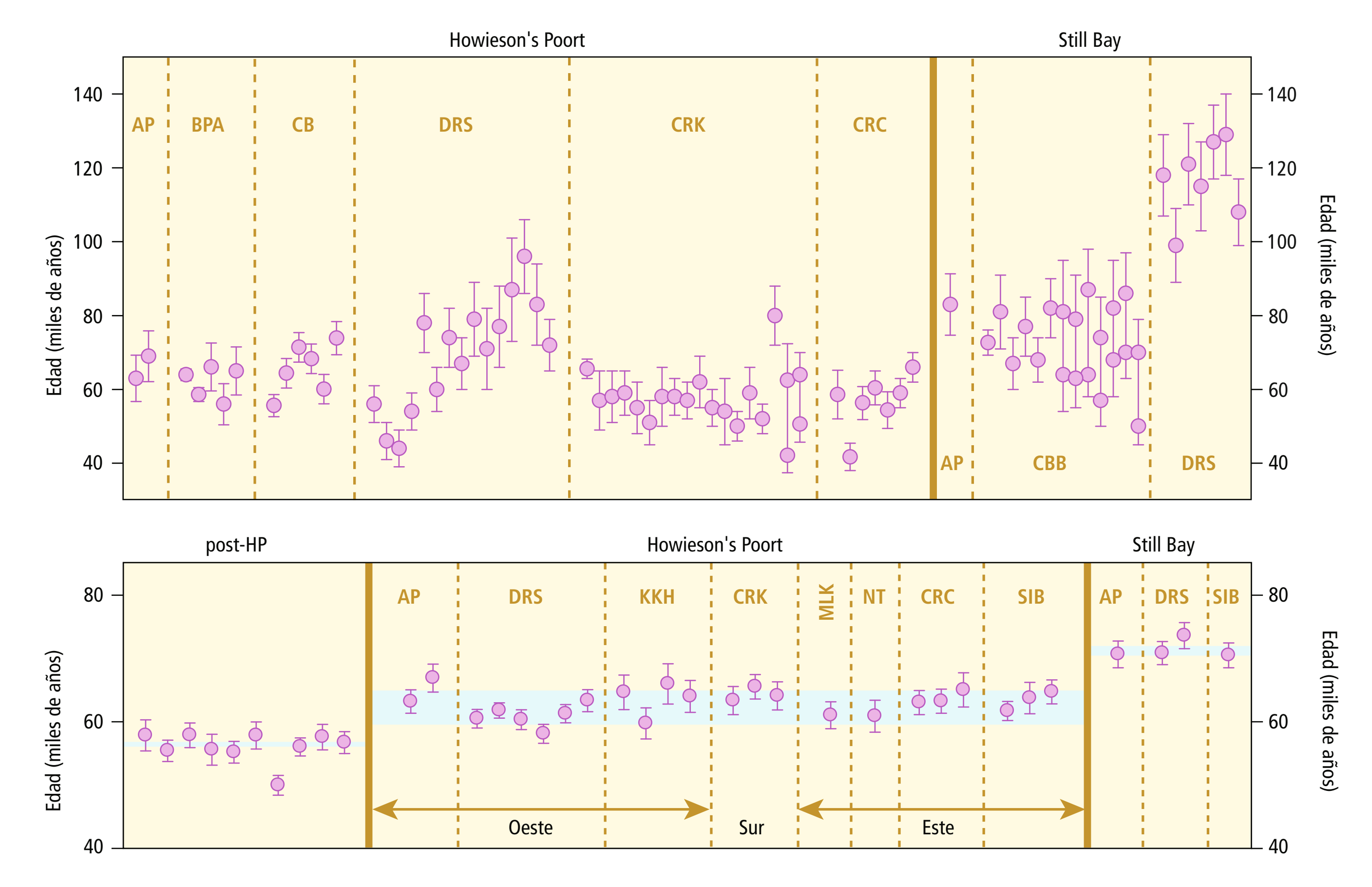
Con todo, determinar el nacimiento y la muerte de una industria lítica no es una tarea sencilla. No basta con analizar los utensilios de un solo yacimiento, puesto que no es probable que la duración de un tipo de industria lítica se halle representada en un único lugar. Deben estudiarse toda una serie de "instantáneas" de yacimientos distintos para saber cuál es la primera y la última fecha de su presencia en el registro arqueológico. Algo más fácil de decir que de hacer, sobre todo en el caso de la industria de Still Bay, que se ha hallado en un número reducido de yacimientos sudafricanos.

El análisis de la industria de Howieson's Poort es más sencillo, ya que se ha localizado en unos 30 yacimientos (entre confirmados y otros menos seguros), que abarcan desde las montañas de Lesotho, el desierto de Namibia, las regiones interiores y subtropicales de Sudáfrica y las áreas costeras e interiores del margen meridional del continente. Todos esos yacimientos corresponden a abrigos naturales y cuevas que fueron utilizados por pueblos cazadores-recolectores como campamentos temporales. Allí se han excavado los restos de sus actividades cotidianas: fuegos, restos de comida y útiles líticos.

La investigación llevada a cabo en esa parte del continente abarca once yacimientos que contienen la industria de Still Bay, la de Howieson's Poort o ambas; entre ellos, la cueva del río Klasies, uno de los yacimientos clásicos de la Edad de Piedra Media de Africa meridional. Otros yacimientos no pudieron ser muestreados o, como en el caso de la cueva Blombos, ya habían sido datados previamente por Jacobs. Seleccionamos yacimientos dispersos geográficamente y situados en ambientes distintos con el propósito de abarcar todo el rango de condiciones climáticas que afectaron a esa región en diferentes épocas. En dos de los yacimientos, los sedimentos no pudieron datarse mediante OSL; pero los nueve yacimientos restantes arrojaron un número suficiente de muestras (un total de 54) que sí fueron fechadas y permitieron determinar la aparición y desaparición de la industria de Howieson's Poort y, con menor seguridad, también la de Still Bay.

Tal y como publicamos en *Science* en 2008, ambas industrias líticas duraron un lapso de tiempo muy breve. Aparecieron de forma abrupta y desaparecieron poco después. Esa misma pauta se observa en un área de dos millones de kilómetros cuadrados, con zonas climáticas y ecológicas muy dispares. Debido a la ausencia de diferencias cronológicas en toda la región, hemos reunido los datos recogidos en un modelo estadístico diseñado por Rex Galbrait, del Colegio Universitario de Londres, para establecer el origen y la desaparición de las industrias de Still Bay y de Howieson's Poort.

Y hemos llegado a las conclusiones siguientes. La industria de Still Bay duró apenas 1000 años (desde hace unos 72.000 años hasta hace 71.000 años). La industria de Howieson's Poort apareció en el registro arqueológico 7000 años más tarde, hace unos 65.000 años, y desapareció de forma repentina cinco milenios más tarde. Le siguió un vacío de 3000 años antes de que apareciera una técnica



7. EDADES DE VARIOS YACIMIENTOS obtenidas por múltiples investigadores mediante distintas técnicas de datación (*arriba*). Las fechas se representan como un rango, donde el círculo central corresponde a la media del valor y la línea vertical al rango de variación. Se muestran también las dataciones obtenidas por los autores mediante OSL (*abajo*). Las bandas azules indican la duración de las industrias líticas de Still Bay y Howieson's Poort y el inicio de la industria posterior a Howieson's Poort (post-HP). Las siglas corresponden a las abreviaturas de los yacimientos que aparecen en la figura 4.

menos refinada que la de la Edad de Piedra Media. El margen de error de esas dataciones es de pocos miles de años con un intervalo de confianza del 95 por ciento, suficientemente preciso para demostrar la naturaleza efímera de esas dos explosiones de innovación técnica y conductual.

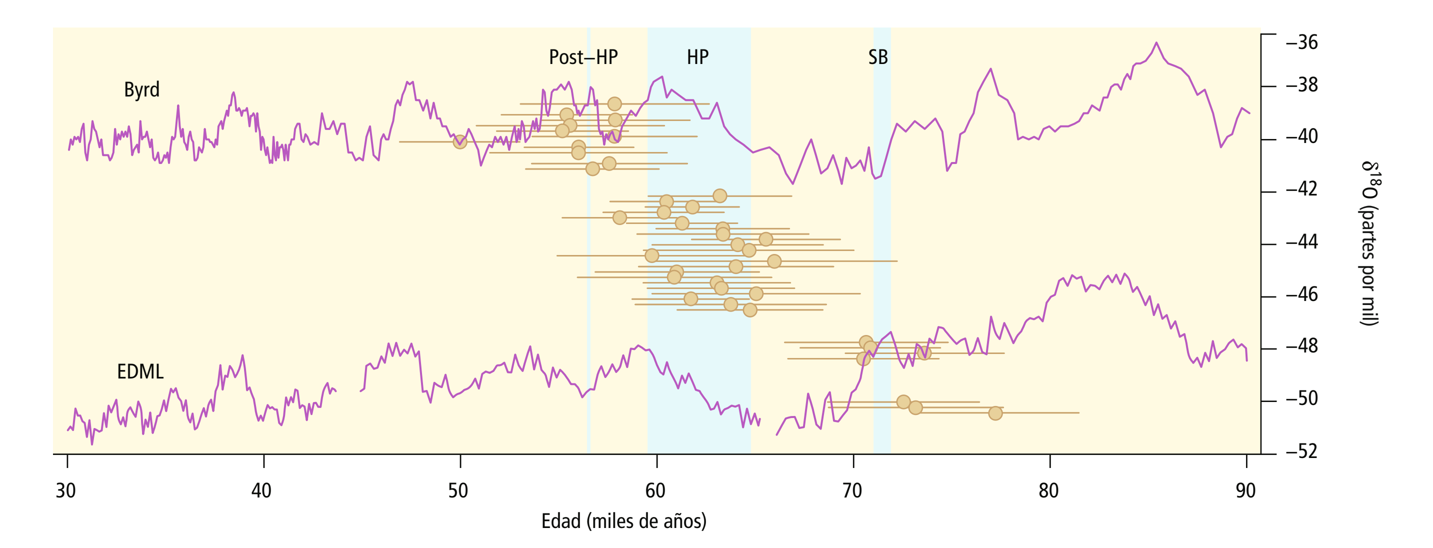
Catalizadores de creatividad

El establecimiento de la cronología de esos artefactos planteó nuevas preguntas. ¿Qué estimuló la aparición de las industrias de Still Bay y Howieson's Poort? ¿Por qué su duración fue tan breve y su desaparición repentina? ¿Cuál es la causa de su aparición instantánea —en términos arqueológicos— y rápida desaparición a lo largo de un área geográfica tan extensa del sur de Africa? Los arqueólogos estudian desde hace tiempo la respuesta de los humanos a los cambios ambientales; y, apoyados en ese conocimiento, el cambio climático es el primer sospechoso.

El último ciclo interglacial/glacial duró desde hace 130.000 años hasta hace 12.000 años; engloba, por tanto, las industrias de Still Bay y de Howieson's Poort. Durante ese período, el sur de Africa experimentó fluctuaciones de temperatura y precipitación que guardan relación con los cambios en el volumen del hielo, el nivel del mar y los patrones generales de circulación oceánica y atmosférica. La cronología y la intensidad de esas fluctuaciones climáticas han sido estudiadas por varios equipos de investigación basándose en cómo fueron cambiando las proporciones entre los distintos isótopos del oxígeno (y la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero) en testigos de hielo antártico y de Groenlandia. Ambos registros paleoclimáticos presentan numerosas similitudes, pero los datos del clima del hemisferio sur obtenidos en la Antártida guardan mayor relación con los cambios climáticos que afectan al sur de Africa.

La extrapolación de los datos de un continente a otro entraña una serie de problemas; asimismo, hay diferencias en la antigüedad y la intensidad de los cambios climáticos en los distintos muestreos antárticos. Con todo, el esquema general sigue siendo claro: la industria de Howieson's Poort apareció en un momento de calentamiento climático; en cuanto a la industria de Still Bay, no podemos estar seguros de que se desarrollase en un período cálido o en uno frío. El hecho de que no hubiera las mismas condiciones climáticas durante esas dos explosiones de innovación técnica parece indicar que su emergencia y desaparición no tuvieron una causa climática común. La ausencia de correlación entre la expresión humana simbólica y un tipo de alteración climática particular

STEPHANIE FREESE



8. LAS NUEVAS DATACIONES obtenidas para las industrias líticas de Still Bay y de Howieson's Poort han permitido relacionar su duración con el registro paleoclimático de los hielos antárticos, los cuales recogen los calentamientos y enfriamientos ocurridos durante las últimas decenas de miles de años. La línea superior se ha obtenido a partir del análisis de las proporciones de los isótopos del oxígeno en el aire almacenado en testigos de hielo de la estación Byrd, en la Antártida oriental. La línea inferior corresponde a las mediciones isotópicas del oxígeno de testigos de hielo extraídos en Dronning Maud Land (Antártida occidental) por el Proyecto Europeo de Muestreo del Hielo Antártico. En el gráfico aparecen también las edades OSL junto con el 95 por ciento de su intervalo de confianza.

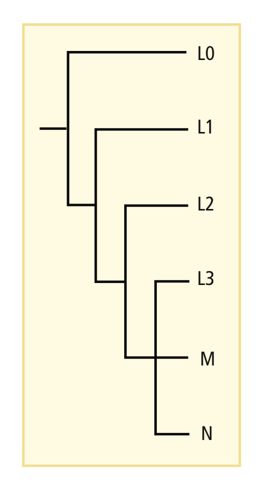
no excluye la posibilidad de que los cambios climáticos pudieran haber influido sobre el lugar y el momento en que fueron ocupadas y abandonados los abrigos rocosos. Al contrario, teniendo en cuenta el tipo de vida de los cazadores-recolectores, los mejores lugares de asentamiento y de acceso a los recursos cambiarían a lo largo del tiempo, en consonancia con los cambios ambientales. De hecho, nuestros datos indican una preferencia por los abrigos rocosos durante los períodos de calentamiento; los asentamientos al aire libre quizá se prefirieron en otros momentos.

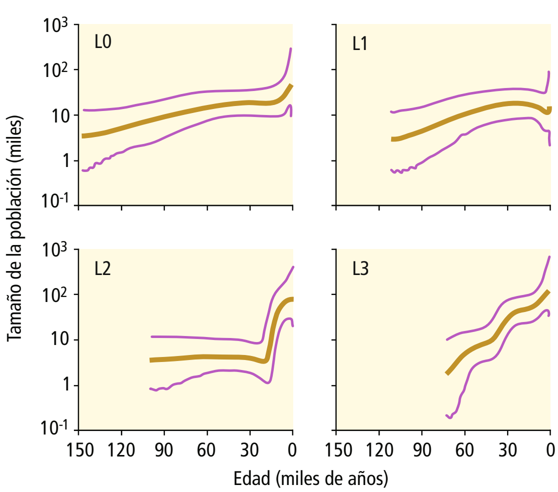
Dos tipos de datos refutan la idea de que la aparición de las industrias de Still Bay y de Howieson's Poort pueda explicarse como una respuesta sólo a cambios ambientales. En primer lugar, ambas industrias se han encontrado en contextos climáticos y biogeográficos distintos, aunque hayan aparecido y desaparecido de forma simultánea en los yacimientos. Si unas condiciones ambientales especiales fuesen la causa de su origen y desaparición, no hallaríamos dicha sincronía. En segundo lugar, a la industria de Howieson's Poort le siguieron tres épocas con una industria lítica menos sofisticada: post-Howieson's Poort, Edad de Piedra Media tardía y Edad de Piedra Media final. No se han hallado pruebas del uso de adornos corporales u objetos simbólicos durante esos períodos. Las dos últimas fases culturales, y posiblemente también la industria de post-Howieson's Poort, aparecieron durante períodos de calentamiento moderado (al igual que la industria de Howieson's Poort); sin embargo, a ninguna de ellas se le han atribuido innovaciones técnicas o de comportamiento. Teniendo en cuenta este marco de datos más amplio, podemos concluir que la aparición de los comportamientos simbólicos durante los períodos de Still Bay y de Howieson's Poort no puede relacionarse exclusivamente con unas condiciones climáticas cálidas, frías o templadas.

Expansiones demográficas

Entonces, ¿qué pudo haber provocado la aparición y desaparición de esas dos explosiones de creatividad e ingenio? Estudios recientes del ADN mitocondrial (ADNmt) de los humanos actuales sugieren que la respuesta puede hallarse en la historia de las expansiones y aislamientos de las poblaciones de cazadores-recolectores. El ADNmt se hereda sólo por vía materna; por tanto, a diferencia del ADN nuclear, no se recombina con los genes mitocondriales paternos. Aunque su estudio entraña varias complejidades que impiden que se llegue a un consenso general sobre la historia demográfica de *Homo sapiens*, el ADN mitocondrial contiene información sobre las expansiones, los declives y las fases de aislamiento que experimentó una población en el pasado. Con todo, en el Africa subsahariana, los datos genéticos ofrecen una visión bastante clara de los principales eventos demográficos que afectaron a la diversidad y dispersión de nuestra especie.

Uno de los estudios más recientes, realizado por Quentin Atkinson y sus colaboradores, de la Universidad de Oxford, identificó cuatro linajes de ADNmt en poblaciones de origen africano: los grupos de haplotipos L0, L1, L2 y L3. El haplogrupo L3 es el más joven; reviste interés sobre todo porque los linajes del ADNmt hallados fuera de Africa, sin excepción, pertenecen a tan sólo dos haplogrupos (M y N), que a su vez descienden de L3. La estimación de la antigüedad y el modelo de expansión de los cuatro haplogrupos principales durante los últimos 150.000 años arroja resultados muy interesantes: el primer crecimiento demográfico empezó hace entre 86.000 y 61.000 años





9. LOS ESTUDIOS DE ADN MITOCONDRIAL (ADNmt) permiten dividir los linajes humanos originarios de Africa en cuatro haplogrupos: L0, L1, L2 y L3. Dos subconjuntos, M y N, descienden del haplogrupo L3; son los únicos linajes de ADNmt hallados fuera de Africa. Según las estimaciones de los tamaños de población de esos grupos a lo largo del tiempo, realizadas por el grupo de Quentin Atkinson, de la Universidad de Oxford, el haplogrupo L3 correspondería a la población que se expandió durante la aparición de las industrias de Still Bay y Howieson's Poort. Se muestran el tamaño medio de la población (*marrón*) y los intervalos de confianza del 95 por ciento (*púrpura*).



en el haplogrupo L3, en un rango temporal que engloba la duración de las industrias de Still Bay y de Howieson's Poort. Ningún otro haplogrupo se expande de forma notable hasta hace 20.000 años.

Resulta tentador relacionar el crecimiento demográfico del haplogrupo L3 con los cambios ambientales que ocurrieron hace 75.000 años. Tal y como apuntan Christopher Scholz y sus colaboradores, de la Universidad de Siracusa, Nueva York, finaliza en ese momento un período de 60.000 años de aridez en Africa oriental, seguido por un período de condiciones en general más húmedas y estables. Además, la supererupción del volcán de Toba en la isla de Sumatra, la mayor erupción que ha sufrido la Tierra desde que existe el género *Homo,* se produjo hace unos 74.000 años. Algunos opinan que la ceniza volcánica y los aerosoles que quedaron suspendidos en la atmósfera produjeron un pequeño invierno volcánico alrededor del planeta que redujo el tamaño de las poblaciones humanas. Pero el final de ese período de aridez extrema en Africa oriental no pudo ser la causa de la expansión demográfica de sólo uno de los cuatro haplogrupos. Y la erupción de Toba es incompatible con el aumento observado en el tamaño del haplogrupo L3. En consecuencia, Atkinson y sus colaboradores han desestimado el cambio ambiental como el único factor responsable del crecimiento de las poblaciones de L3 y la migración de sus descendientes fuera de Africa 10.000 años más tarde.

Como explicación alternativa, propusieron que algún tipo de innovación cultural y un aumento en la complejidad conductual entre los miembros del haplogrupo L3 les proporcionó una ventaja competitiva sobre sus rivales, quizá mejorando la eficacia técnica, la productividad económica, la cohesión social y la coordinación del grupo. Las fechas que hemos obtenido para las industrias de Still Bay y de Howieson's Poort encajan exactamente con la datación de este crecimiento demográfico. Sin embargo, no podemos confirmar si la innovación técnica fue la causa o la consecuencia de la expansión del haplogrupo L3. Aunque los miles de kilómetros que separan Africa meridional de Africa oriental, lugar donde el haplogrupo L3 es más diverso y parece tener su origen, apuntan a la segunda hipótesis como la más probable. Para resolver cuál es la causa y cuál es la consecuencia, debe establecerse una cronología más precisa de la expansión de las poblaciones del haplogrupo L3 y compararla con las fechas de aparición y desaparición de las industrias de Still Bay, de Howieson's Poort y de otros conjuntos de útiles líticos sofisticados hallados en el norte y en el este de Africa.

Reducciones demográficas

El ADNmt recoge también información sobre los períodos de aislamiento que sufre una población. Los expertos cada vez están más de acuerdo en que nuestra especie experimentó varios de esos episodios en el Africa sudsahariana y no siempre hubo una población continua geográficamente. Se ha prestado una atención particular al haplogrupo L0, ya que es el más antiguo de los linajes de ADNmt africano y tiene dos ramas (L0d y L0k) prevalentes en los "bosquimanos" khoi y san (khoisan) de Africa sudoccidental. Los khoisan conservan un modo de subsistencia de tipo cazador-recolector; son famosos por emplear un lenguaje hablado basado en chasquidos. Estudios recientes a partir de secuencias completas de ADNmt indican que los khoisan quedaron aislados genéticamente hace más de 90.000 años. Sólo tras la aparición de la Edad de Piedra Tardía, decenas de miles de años más tarde, se renovó el ADNmt de los khoisan con un nuevo aporte de genes, lo que es coherente con una familia lingüística con raíces muy antiguas.

Mediante el estudio del haplogrupo L1c, que permite rastrear la historia del ADNmt de los pueblos pigmeos cazadores-recolectores, se ha descubierto en Africa central tropical un modelo demográfico similar. Los antepasados de esos pobladores de la selva húmeda ecuatorial quedaron genéticamente aislados hace al menos 74.000 años, reanudándose el flujo genético hace unos 40.000 años. Asimismo, no podemos descartar la posibilidad de que el haplogrupo L3 experimentase episodios de aislamiento genético, junto a la tendencia general de un crecimiento demográfico y expansión entre hace 80.000 y 60.000 años. ¿La proximidad temporal de esos cambios demográficos en el Africa subsahariana y las industrias Still Bay y Howieson's Poort es una mera coincidencia? En nuestra opinión, no.

Los pulsos sucesivos de expansión y reducción de las poblaciones en Africa meridional podrían explicar por qué la industria de Still Bay apareció de forma abrupta en una área tan extensa y desapareció en menos de un milenio, y por qué la industria de Howieson's Poort empezó 7000 años después y duró unos 5000 años. Para que las innovaciones técnicas y de conducta se difundan rápidamente es imprescindible que exista una red social que facilite la transmisión de nuevas ideas e invenciones. Durante los períodos de expansión de la población del haplogrupo L3 se pudo crear dicha red de contactos y, a su vez, incentivar el comercio a larga distancia, el intercambio de tipos de piedra de mejor calidad y la difusión de artefactos simbólicos por todo el sur de Africa.

Según la hipótesis anterior, el hueco existente en el registro arqueológico entre Still Bay y Howieson's Poort representa un período de reducción de la población durante el cual se debilitaron o destruyeron las redes sociales. Las causas de esa desaparición siguen siendo un enigma, pero quizás unas condiciones climáticas más frías alteraron el equilibrio ambiental, cambiando la distribución, diversidad, previsibilidad y productividad de los recursos de los pueblos cazadores-recolectores. Si esos cambios obligaron a las poblaciones a abandonar los lugares de asentamiento y desplazarse para encontrar recursos, pudieron tensarse o romperse los eslabones de la red social, lo que habría aislado las innovaciones en el seno de grupos reducidos con una distribución geográfica más limitada.

Sería necesaria una nueva explosión demográfica para recuperar la red social en el sur de Africa, lo que resultaría en la difusión de la última innovación técnica asociada a la industria de Howieson's Poort (puntas de dorso para las armas de caza). Esa red subcontinental integrada se mantuvo durante más de cinco milenios hasta que desapareció hace unos 60.000 años, quizá como consecuencia de una nueva reducción de la población y de una fase de aislamiento que se detecta en los estudios genéticos. Hasta al cabo de 20.000 años (el final de la Edad de Piedra Media en Africa oriental) no emergió una industria lítica tan sofisticada, momento en que aparece otra prueba de flujo genético al sur del Sahara.

Sacar a la luz la verdad

La hipótesis que hemos recogido mezcla datos y especulación; se basa en informaciones dispares, algunas de más firmes que otras. Pero es consistente con las simulaciones teóricas llevadas a cabo en 2001 por Stephen Shennan, del Colegio Universitario de Londres, que indican que las innovaciones culturales se mantienen y se comparten mejor en poblaciones de mayor tamaño. Probablemente, la transmisión de las innovaciones técnicas y conductuales se transmitirían mejor durante los períodos de crecimiento demográfico, como los asociados a las industrias de Still Bay y Howieson's Poort. Esas novedades probablemente se hubieran perdido cuando las poblaciones encogieron y quedaron aisladas. Según las simulaciones, al surgir diferencias culturales entre las poblaciones segregadas la migración descendió y el crecimiento demográfico se limitó aún más. En consecuencia, la aparición y la desaparición de las industrias de Still Bay y Howieson's Poort probablemente guardan relación con la historia demográfica y el tejido social de nuestros antepasados cazadores-recolectores.

El siguiente reto consiste en convertir las conclusiones especulativas en afirmaciones sólidas. Para comprender la aparición de la conducta humana moderna serán necesarias las aportaciones de la arqueología, ecología, genética, lingüística y otras ciencias paleoambientales. También es indispensable obtener dataciones fiables de los acontecimientos arqueológicos, genéticos, demográficos y ambientales, y colocar cada uno de ellos en una escala temporal de gran resolución. Hoy en día, no podemos explicar la expansión de la población del haplogrupo L3 en Africa subsahariana como resultado directo de un cambio ambiental determinado. La datación de los cambios climáticos y demográficos es demasiado imprecisa para situarlos en un orden cronológico correcto.

Es posible que un destello de ingenio en un grupo de portadores del haplotipo L3 en Africa oriental fuese el catalizador de la innovación cultural. Y quizás esa innovación alentó la cohesión social y el uso más eficaz de recursos naturales, estimulando un rápido crecimiento de la población en ese grupo de individuos. La expansión demográfica pudo, a su vez, provocar más innovaciones (como las industrias de Still Bay y de Howieson's Poort en el sur de Africa) y la migración de poblaciones fuera de Africa hacia el norte. El próximo paso consistirá en desentrañar las fases culturales más importantes del norte y el este de Africa con una precisión similar a la que hemos logrado en el sur. Debemos situar todos los acontecimientos arqueológicos en la misma escala cronológica y relacionarlos con los eventos climáticos, genéticos y demográficos del continente. La ordenación de todos los elementos en la misma secuencia temporal nos permitirá conocer las relaciones de causa y efecto entre éstos y construir un modelo más sólido de la prehistoria de los humanos modernos.

Los autores

Zenobia Jacobs es investigadora de la facultad de ciencias de la tierra y ambientales de la Universidad de Wollongong. Obtuvo su doctorado en 2004 en la Universidad de Aberystwyth. Centra su investigación en los métodos de datación por OSL en granos de cuarzo y su aplicación al estudio de la evolución de los humanos modernos en Africa. **Richard G. Roberts** recibió su doctorado en geomorfología por la Universidad de Wollongong en 1991. Trabaja en el mismo centro que Jacobs, donde dirige el equipo de datación por OSL.

Bibliografía complementaria

TESTING TIMES: OLD AND NEW CHRONOLOGIES FOR THE HOWIESON'S POORT AND STILL BAY INDUSTRIES IN ENVIRONMENTAL CONTEXT. Z. Jacobs y R. G. Roberts en *South African Archaeological Society Goodwin Series*, vol. 10, págs. 9-34; 2008.

MATERNAL TRACES OF DEEP COMMON ANCESTRY AND ASYMMETRIC GENE FLOW BETWEEN PYGMY HUNTER-GATHERERS AND BANTU-SPEAKING FARMERS. L. Quintana-Murci et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol. 105, págs. 1596-1601; 2008.

BAYESIAN COALESCENT INFERENCE OF MAJOR HUMAN MITOCHONDRIAL DNA HAPLOGROUP EXPANSIONS IN AFRICA. Q. D. Atkinson, R. D. Gray y A. J. Drummond en *Proceedings of the Royal Society of London B*, vol. 276, págs. 367-373; 2009.

CULTURE, POPULATION STRUCTURE, AND LOW GENETIC DIVERSITY IN PLEISTOCENE HOMININS. L. S. Premo y J.-J. Hublin en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol. 106, págs. 33-37; 2009.

EL ORIGEN DEL NEOLITICO

JUAN JOSE IBAÑEZ

La invención de la agricultura y de la ganadería, que se inició hace 12.000 años, se vio acompañada de la aparición de los primeros poblados estables, los intercambios a larga distancia, la generalización de las representaciones humanas o la aparición de los primeros edificios destinados al culto

La humanidad vivió de la depredación desde sus orígenes, hace 2,5 millones de años, hasta hace poco más de 10.000 años. Entonces se produjo un hecho revolucionario que cambió nuestra historia: comenzamos a producir alimentos gracias a la práctica de la agricultura y de la ganadería.

Aun cuando las invenciones de la agricultura y de la ganadería tuvieron una enorme importancia, no fueron los únicos cambios que acontecieron con el Neolítico. La producción de alimentos estuvo asociada a la sedentarización de las poblaciones, la aparición de los primeros poblados con decenas de casas y centenares de habitantes, el inicio de la especialización artesanal y la proliferación de los intercambios a larga distancia o la construcción de las primeras edificaciones destinadas al culto. Por tanto, el Neolítico supone una serie de transformaciones económicas, sociales y de pensamiento que darían paso al surgimiento de las civilizaciones antiguas.

De cazadores-recolectores a agricultores y ganaderos

¿Dónde se produjeron estos cambios por primera vez? En las primeras décadas del siglo XX, el biólogo soviético Nikolai Ivanovich Vavilov propuso una serie de focos de invención de la agricultura. Se basaba en la presencia de los precursores silvestres de las plantas cultivadas en diferentes zonas del planeta. Posteriormente, las investigaciones de arqueólogos y expertos en genética han llevado a definir con precisión los lugares de origen de estos cambios y a confirmar muchas de las propuestas de Vavilov.

La domesticación de plantas y animales tuvo lugar, en primer lugar, en tres grandes zonas de manera independiente: el Próximo Oriente, China y el centro-sur de América. En el Próximo Oriente, en los actuales estados de Jordania, Israel, Siria y sur de Turquía, los últimos cazadores-recolectores comenzaron a realizar las primeras experiencias agrícolas en el décimo milenio antes de Cristo (a.C.). Allí se domesticaron numerosas especies de cereales (trigo, cebada, centeno), de leguminosas (lentejas, guisantes) y de animales (cabra, oveja, vaca y cerdo). Posteriormente, la agricultura y la ganadería se expandieron desde allí hacia

CONCEPTOS BASICOS

- Después de cientos de miles de años viviendo de la depredación, el hombre comenzó a producir alimentos hace alrededor de 12.000 años.
- La invención de la agricultura y de la ganadería se vio acompañada de importantes transformaciones en la sociedad y en la mentalidad de las poblaciones prehistóricas. A este conjunto de cambios se le denomina Neolítico.
- A partir de los focos de origen (Próximo Oriente, China, México y Perú), el Neolítico se expandió con relativa rapidez a amplias regiones del globo.
- Las primeras comunidades de agricultores y ganaderos aparecen en la península Ibérica en el sexto milenio a.C.

1. HUESO CON DECORACION DE CARAS HUMANAS encontrado en la excavación de Tell Qarassa, de la segunda mitad del noveno milenio a.C. (excavación de F. Braemer y J. J. Ibáñez). Con el Neolítico comienzan a generalizarse en el arte las imágenes humanas, mientras que las representaciones figurativas anteriores eran fundamentalmente de tema animal.

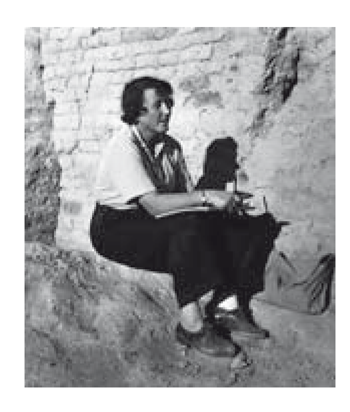
F. BRAEMER, J. J. IBAÑEZ Y LUIS TEIRA





NIKOLAI IVANOVICH VAVILOV, biólogo soviético cuyo trabajo, en los años veinte del siglo XX, sirvió para identificar las áreas de origen donde se domesticaron los principales cultivos.

KATHLEEN KENYON, arqueóloga británica que excavó en el yacimiento de Jericó (actual Palestina). Allí pudo documentar por primera vez la transición entre los últimos grupos de cazadores-recolectores natufienses y los primeros agricultores y ganaderos. Fue fundadora y directora del Instituto de Arqueología de la Universidad de Londres.



J. J. IBAÑEZ

Europa, el norte de Africa y el centro y sur de Asia.

En América, los cambios hacia la producción de alimentos tuvieron lugar en el centro de México y en Perú. En México se domesticó el maíz, a partir de una planta silvestre llamada teosinte, a lo largo del quinto milenio a.C. Otros cultivos mexicanos fueron los fríjoles y la calabaza. Perú, otro importante foco de origen de la economía de producción, aportó la domesticación de la patata y de varias especies de camélidos. Los dos focos americanos fueron el origen de la neolitización de Centroamérica y del sur de Estados Unidos.

El norte de China fue un dinámico foco de neolitización durante el séptimo milenio a.C. En ese período aparecieron poblados con aglomeraciones humanas de cierta importancia y una economía en la que, además de los recursos de la caza y la recolección, empezó el cultivo del mijo y el cuidado de cerdos, perros y pollos. Paralelamente, más al sur, en la cuenca del Yangtze, se domesticó el arroz. Este foco chino fue el transmisor de la agricultura hacia el sudeste de Asia, Japón y el este de la India.

Abordar el origen del Neolítico en una escala mundial, aunque sea de forma somera, queda fuera de las posibilidades de un artículo como el presente. Por ello, nos vamos a centrar en uno de los focos de neolitización: el Próximo Oriente. Se trata del neolítico más antiguo de la humanidad, cuya expansión originó el cambio de las formas de vida de las comunidades que habitaban la península Ibérica entre el sexto y el quinto milenios a.C.

Los orígenes en el Próximo Oriente

Las hipótesis de Vavilov sobre la existencia de un foco de origen del Neolítico en el Próximo Oriente se vieron confirmadas por las excavaciones de Kathleen Kenyon en el yacimiento de Jericó, en la actual Palestina, durante los años cincuenta del siglo XX. Previamente, durante los años veinte, se había descubierto una nueva cultura, el Natufiense, con poblados estables, silos, indicios del aprovechamiento de cereales y notables manifestaciones artísticas en su cultura material. Se propuso que se trataba de las primeras comunidades agrícolas, aunque ahora sabemos que en realidad fueron los últimos grupos de cazadores-recolectores, que habían llegado a un grado de complejidad económica y social tal, que presagiaba los cambios neolíticos.

En Jericó, Kenyon documentó que, sobre una base natufiense, había una serie de niveles de ocupación neolíticos en los que aún no se utilizaba la cerámica. Distinguió una fase de Precerámico A, con casas redondas; otra de Precerámico B, con casas cuadradas, y una posterior de Neolítico con cerámicas. Las excavaciones que desde entonces se llevaron a cabo en diversos yacimientos de la zona del Jordán confirmaron que, en esta zona del Levante sur, se había producido una evolución *in situ* hacia la economía de producción. ¿Se trataba del foco de origen donde se había inventado la nueva forma de vivir?

Durante los años setenta del siglo XX, las excavaciones de Jacques Cauvin en Tell Mureybet, en el Eufrates medio, pusieron en evidencia, en esa zona del Levante norte, una evolución similar a la que se había documentado en el Jordán. Las recientes excavaciones de Danielle Stordeur en el yacimiento de Jerf al Ahmar, con una importante secuencia de Precerámico A, refleja la evolución de un poblado de cabañas redondas a otro de casas cuadradas con compartimentación interna en habitaciones. Además, el núcleo de habitación se articula en torno a una construcción subterránea de claro significado simbólico que parece reflejar, por primera vez, la existencia de algún tipo de autoridad social vinculada al mundo de las creencias.

Un poco más al norte, cerca de la actual ciudad turca de Urfa, las excavaciones de Klaus Schmidt en Gobekli han desenterrado diversas construcciones redondas enterradas, del Precerámico A, que contienen monolitos monumentales en piedra profusamente decorados con relieves. Estas construcciones reflejan la importancia del ritual y el culto en las primeras comunidades neolíticas.

En la actualidad se ha podido dibujar un esquema bastante preciso del origen del Neolítico en Próximo Oriente. Los últimos grupos de cazadores-recolectores natufienses establecieron poblados estables entre 12.500 y 9800 años a.C. Practicaban una economía de caza y recolección con una amplia variedad de recursos, entre los que destacan la caza de la gacela y la recolección de cereales silvestres. Hasta hace bien poco se localizaba el origen de esta cultura exclusivamente en la zona del Jordán, pero los últimos trabajos en curso, entre los que se encuentran nuestras excavaciones en el yacimiento de Jeftelik o las de un equipo japonés en Dederiyeh, muestran que también existieron ocupaciones del Natufiense antiguo más al norte, a lo largo de la falla del Gran Valle del Rift, en el cinturón de bosque mediterráneo que se halla entre el Jordán y la desembocadura del Orontes.

Hacia el año 9700 a.C. surgen los primeros yacimientos neolíticos de Precerámico A, en la zona del Jordán y del medio Eufrates. En esos momentos se documentan los primeros indicios de prácticas agrícolas con cereales y

leguminosas, aunque las semillas cultivadas son aún morfológicamente silvestres.

Un milenio más tarde se inicia el período del Precerámico B, donde se generaliza el modelo de casas rectangulares-cuadradas que se agrupan en amplios poblados. Ese período parecía generarse exclusivamente en el medio Eufrates, pero nuestras excavaciones en Tell Qarassa (Sweida, Siria) indican que, una vez más, se produjo una evolución cultural paralela en el Levante norte y el Levante sur.

A partir de tales zonas, el Neolítico experimenta una primera fase de difusión, hacia el Levante central, Anatolia y la isla de Chipre, expansión esta última que demuestra un gran dominio de las técnicas de navegación. En la fase antigua del Precerámico B aparecen los primeros indicios de la domesticación de la vaca, la cabra, la oveja y el cerdo. Hacia 8300 a.C., los cereales cultivados ya son morfológicamente domésticos. En esas fechas, los amplios poblados de casas rectangulares y pluricelulares agrupan a cientos de personas, como sucede en Ain Ghazal, Tell Halula o Asikli Höyük. Hacia el año 7000 a.C. aparecen en Próximo Oriente las primeras producciones cerámicas.



2. MAPA DE LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS natufienses y neolíticos de Próximo Oriente.

La domesticación de plantas y animales

Domesticar plantas y animales implica controlar su reproducción y crecimiento, aprovechándolos en beneficio propio. Para ello se debe actuar sobre las especies naturales, que se denominan agriotipos, a través de prácticas de mejora y separándolas de su hábitat original para introducirlas en un ámbito nuevo, creado por los humanos. Además, posteriormente, se debe mantener a la población mejorada separada de la silvestre; en algunos casos, puede crearse incluso una nueva especie.

La mejora puede ser consciente, cuando se cruzan individuos o variedades de especies con el fin de obtener nuevas generaciones con caracteres deseados, como ha sucedido con perros, o inconsciente, cuando las modificaciones genéticas son inducidas por comportamientos humanos sin que haya un control voluntario de los caracteres de la nueva variedad o especie, como sucedió con los cereales.

Las gramíneas silvestres tienen unos mecanismos naturales de reproducción. Hacia el final de la primavera, las espigas de un mismo campo comienzan a amarillear a ritmos diferentes, empezando por la zona alta de la espiga y de ahí hasta su base. Cuando la espiguilla (cada uno de los granos con su envoltorio, llamado gluma, y antenas) madura, cae de la espiga y se implanta en el suelo, a la espera del período de germinación.

Sin embargo, los cereales domésticos tienen estos mecanismos reproductivos inhibidos (maduran todos a la vez y la espiga se mantiene entera, aunque esté amarilla), por lo que depende para su reproducción del cultivo por parte del ser humano. ¿Cómo se produjeron estos cambios? Antes de que esto pasara debió de haber una fase de depredación de cereales silvestres y una posterior de cultivo de los cereales. Los seres humanos se dieron cuenta de que al introducir las semillas en la tierra obtenían una nueva cosecha.

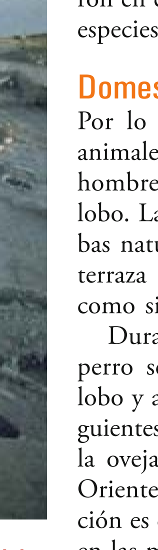
En Ohalo II (Israel) se tienen pruebas del consumo de cereales silvestres hace 20.000 años. El cultivo de cereales se produciría en el Neolítico Precerámico A, 9300 años a.C., como se observa en el yacimiento de Tell Mureybet (norte de Siria).

Probablemente, en este proceso desempeñó un papel crucial el uso de hoces de sílex para la siega de cereales silvestres. Dentro de cualquier población de cereales se producen mutaciones cuyos portadores presentan inhibidos los mecanismos de reproducción. En condiciones normales, estos individuos no se reproducirían. Sin embargo, la siega de cereales silvestres favorecería la presencia de individuos mutantes en la población recolectada. Había que segarlos antes de la maduración, cuando el grano estaba formado, pero la planta no

El autor

Juan José Ibáñez es investigador científico en el departamento de arqueología y antropología de la Institución Milá y Fontanals del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Desde 2004 dirige un proyecto de investigación sobre el origen del Neolítico en Siria, que conlleva la excavación de los yacimientos natufienses de Jeftelik y Qarassa 3 y los yacimientos neolíticos de Tell Qarassa y Tell al Marj. Entre otras publicaciones sobre el tema, ha dirigido la monografía del yacimiento de Tell Mureybet.

MAPA ELABORADO POR LUIS TEIRA



3. EXCAVACION DE LOS NIVELES DE PRECERAMICO A en Jerf el Ahmar, principios del noveno milenio a.C. Las cabañas circulares de la base del yacimiento se han transformado en casas cuadradas compartimentadas en estancias. El poblado se articula alrededor de una construcción redonda enterrada, de función práctica (trabajo, almacenamiento) y ritual.

4. CRANEOS MODELADOS DE TELL ASWAD. Durante el primer neolítico del Próximo Oriente, los restos humanos eran objeto de complejos rituales, que se proponían asociar a los difuntos con los vivos. Los cráneos se modelaban para recuperar simbólicamente la cara del difunto.

había amarilleado, pues, una vez amarilleada, las espiguillas caerían de forma natural. Si esta población se vuelve a sembrar y a seleccionar por siega, se llegará a crear una nueva especie ya doméstica.

Las primeras especies domésticas fueron los cereales vestidos (*Triticum monoccocum*, *T. diccocum*, etc.), que aún se cultivan de forma marginal en algunos lugares, como el norte de Marruecos, Asturias o Córdoba. Las leguminosas (lentejas, habas y guisantes) se domesticaron en el Próximo Oriente por recolección de especies silvestres y cultivos sucesivos.

Domesticación y mejora animal

Por lo que respecta a la domesticación de animales, la primera especie dependiente del hombre fue el perro, cuyo agriotipo fue el lobo. La presencia de restos de perro en tumbas natufienses, como en el yacimiento de la terraza de Hayonim, en Israel, se interpreta como signo de su domesticación.

Durante el proceso de domesticación, el perro se redujo de tamaño con respecto al lobo y adquirió la capacidad de ladrar. Las siguientes especies domesticadas fueron la cabra, la oveja y los bóvidos. El lugar de Próximo Oriente en el que se produjo esta domesticación es desconocido. Las ovejas salvajes vivían en las montañas del Líbano, Siria central y el Zagros. Las cabras y los grandes bóvidos eran más ubicuos. La domesticación debió de realizarse mediante captura de algunos individuos y control de su reproducción. Esta práctica de mejora produjo la reducción de talla de las especies en vías de domesticación, pues se eliminaron los mecanismos naturales por los que se seleccionan los individuos más grandes y fuertes para la reproducción.

Los datos sobre el tamaño de las nuevas especies domésticas y los patrones de aprovechamiento de los animales permiten fechar las primeras poblaciones domésticas en el Precerámico B antiguo, en la primera mitad del noveno milenio a.C. Hacia finales de ese milenio, la caza ya tenía un papel secundario

en la alimentación cárnica de las poblaciones neolíticas, que recurrían fundamentalmente a los recursos del pastoreo.

Hasta hace bien poco se suponía que el objetivo de esta primera domesticación fue exclusivamente el consumo de carne, mientras que el aprovechamiento de la leche se produciría milenios más tarde. Sin embargo, recientes investigaciones sobre los residuos orgánicos en los recipientes neolíticos parecen indicar que el consumo de leche fue muy temprano.

La expansión del Neolítico a Europa, Africa y Asia

Como hemos visto, la transición de las formas de vida de los cazadores-recolectores a las de agricultores y ganaderos se conoce en dos áreas de Próximo Oriente: el valle medio del Eufrates y el valle del Jordán. A partir del Precerámico B medio, en torno a 7000 años a.C., momento en que aparecen los grandes poblados de casas rectangulares y se explotan plantas y animales domésticos, se produce una primera gran expansión de las formas de vida neolíticas. Los yacimientos neolíticos aparecen en todo el Levante, Mesopotamia, Anatolia central y Chipre.

Desde el Próximo Oriente, las formas de vida neolíticas se expanden a vastas regiones de Europa, Asia central y del sur y norte de Africa. Nuestro conocimiento del proceso de expansión en Europa es bastante detallado, mientras que los datos sobre Asia y norte de Africa son más escasos. Se ha debatido largamente sobre la naturaleza de esa expansión: ¿se trataba de grupos de colonizadores neolíticos que migraban o eran las poblaciones locales de cazadores-recolectores las que adoptaban las nuevas formas de vida?

Ahora sabemos que ambas realidades existieron, teniendo una u otra mayor o menor importancia, en distintos momentos y lugares. También se dieron zonas donde los grupos de cazadores-recolectores no aceptaron los cambios y siguieron con sus viejas prácticas, aunque interrelacionándose con los nuevos agricultores y ganaderos. En todo caso, el proceso de neolitización, fue, de manera global, relativamente rápido, pues un milenio y medio después del surgimiento en Próximo Oriente, buena parte de las regiones de Eurasia y norte de Africa señaladas veían la presencia de poblados de agricultores y ganaderos.

A partir de Anatolia, se conoce con cierto detalle la expansión neolítica hacia Europa. Grecia y los Balcanes se neolitizan en fechas antiguas: desde inicios del séptimo milenio en Grecia y a lo largo de ese milenio en los Balcanes. Desde los Balcanes se establece una línea de expansión por las llanuras de Europa central, en lo que se ha denominado Cultura de la Cerámica de Bandas. En el Mediterráneo, las comunidades neolíticas se han caracterizado por sus cerámicas impresas.

La cultura de la Cerámica de Bandas presenta cierta uniformidad en Europa central, desde el sudoeste de Ucrania y el Moldova hasta la cuenca parisiense en el oeste, entre la primera mitad y finales del sexto milenio a.C. Esta uniformidad en su cultura material y el escaso lapso cronológico de desarrollo implican una rápida expansión de los grupos neolíticos hacia el norte y el oeste. Los poblados están formados por largas casas rectangulares, que debieron de acoger a varias unidades familiares. Su cerámica, de formas simples, está decorada con líneas incisas, que dibujan bandas.

Se trata de comunidades que basan su economía en el cultivo de los cereales vestidos y las leguminosas, además de pastorear vacas, ovejas y cabras. Algunos de los objetos y de las materias primas utilizadas indican la existencia de una red de intercambios a larga distancia. La presencia de indicios de violencia en los esqueletos enterrados y las fortificaciones en-



5. EXCAVACION ARQUEOLOGICA EN TELL ASWAD, yacimiento de Precerámico B cerca de Damasco, de finales del noveno y octavo milenios a.C., bajo la responsabilidad de un equipo del CNRS dirigido por D. Stordeur. Los tell son colinas artificiales formadas por la acumulación de sucesivos niveles de ocupación. Las primeras casas de los poblados neolíticos del Próximo Oriente se construyeron con piedra o con adobe.



6. EXCAVACION DE UN ENTERRAMIENTO HUMANO en el yacimiento Precerámico B Antiguo de Tell Qarassa, segunda mitad del noveno milenio a.C. El cadáver se enterró junto al muro de piedra de una casa, una vez que ésta había sido ya abandonada y se encontraba en ruinas. El cadáver se colocó en posición fetal. Posteriormente, se accedió a la tumba y se retiró el cráneo, como parte de un ritual de asociación de los antepasados al mundo de los vivos.



7. SIEGA EXPERIMENTAL DE CEREALES SILVESTRES con una reproducción de hoz neolítica en el Jebel Drouze (sur de Siria). La siega con hoz debió de desempeñar una función fundamental en la domesticación de los cereales. La reproducción experimental de comportamientos técnicos constituye una práctica básica de la investigación arqueológica.

contradas en algunos yacimientos señalan que estas comunidades no eran ajenas a situaciones de violencia. La neolitización de Europa central no impidió, sin embargo, la permanencia de comunidades de cazadores recolectores al norte, en el área escandinava, durante más de un milenio.

En el Mediterráneo central y occidental, la expansión neolítica se produjo con bastante rapidez, de lo que se deduce que debió de haber una transmisión de conocimientos y un traslado de poblaciones tanto por vía terrestre como marítima. Las comunidades neolíticas, que utilizaban recipientes a veces profusamente adornados con decoración impresa, se asentaron en pequeños poblados rodeados por fosos circulares, que protegían casas rectangulares. En el sur de Italia y en la costa dálmata, el primer neolítico data de la primera mitad del sexto milenio. A lo largo de ese sexto milenio las nuevas formas de vida llegaron a los extremos occidentales del Mediterráneo.



8. EXCAVACION DEL YACIMIENTO NEOLITICO LACUSTRE de La Draga, Bañolas, de finales del sexto milenio a.C. La preservación en húmedo ha permitido recuperar numerosos postes de las casas, además de otros objetos de madera.

La expansión del Neolítico hacia Asia central y del sur tuvo lugar a través de la gran meseta iraní. Comunidades agrarias y pastores de cabras y ovejas, con casas de morfología rectangular, aparecen en el sur de Turkmenistán durante el sexto milenio a.C., en lo que se ha denominado la cultura Jeitun. En Pakistán occidental, el yacimiento de Mehrgarh, con arquitectura rectangular de adobe y una economía agropastoral bien desarrollada, presenta fechas tempranas, de mediados del séptimo milenio a.C. Si bien, según hemos visto, se produjo un foco independiente de neolitización en China, la influencia del foco próximo-oriental llegó hasta tierras tan orientales ya durante la Prehistoria, transmitiendo allá el cultivo del trigo y de la cebada.

La expansión del Neolítico hacia el este a lo largo del norte de Africa está muy pobremente documentada. El primer neolítico egipcio, encontrado en el oasis de El Fayum, data de la segunda mitad del sexto milenio. Dada la cercanía de Egipto al foco próximo-oriental, parecen extrañas unas fechas tan recientes, por lo que es probable que la primera expansión neolítica en Egipto fuera más antigua; sus pruebas arqueológicas no se han encontrado al quedar, quizá, profundamente enterradas en las zonas de inundación del valle del Nilo. En cualquier caso, a lo largo del sexto milenio, encontramos grupos neolíticos en Libia y en la costa norte del Magreb.

Los orígenes en la península Ibérica

Los yacimientos arqueológicos con ocupaciones de agricultores y ganaderos más antiguas, de mediados del sexto milenio a.C., se localizan en dos áreas precisas de la península Ibérica: el área suroeste, la costa valenciana fundamentalmente, y el área noroeste, con algunos yacimientos catalanes y del norte de Aragón. Este dato, junto a algunos aspectos de la cultura material que diferencian los yacimientos meridionales de los septentrionales, parece indicar que el Neolítico de la península Ibérica tiene dos zonas diferentes de introducción. Por una parte, el foco meridional se vincularía a la vía de expansión a través del sur del Mediterráneo, a través del sur de Italia, Sicilia y norte de Africa. Por otra parte, los grupos neolíticos nororientales se originarían como resultado de la expansión a lo largo del norte del Mediterráneo, a través del área liguro-provenzal y el golfo de León.

Entre los yacimientos meridionales destacan las cuevas valencianas de Or y Sarsa. Más recientemente, el yacimiento de Mas d'Is ha aportado datos importantes sobre el primer Neolítico de la zona. Se trata de un poblado al aire libre, situado en Penàguila, Alicante, delimitado por fosos circulares concéntricos y sucesivos, en cuya cercanía encontramos casas rectangulares con un extremo absidal, fabricadas con postes.

Entre los yacimientos nororientales hay que mencionar el poblado de La Draga, en la orilla del lago de Bañolas. Allí, la presencia del lago ha permitido la preservación en húmedo de los restos de madera con los que se fabricaron los utensilios y de los postes y vigas con que se construyeron las casas rectangulares.

Estas primeras comunidades neolíticas presentan una economía plenamente productiva: cultivan cereales y leguminosas y pastorean cabras, vacas, ovejas y cerdos. Durante el primer Neolítico no se observa una adquisición progresiva de las nuevas técnicas por parte de las poblaciones de cazadores-recolectores locales, sino la presencia de comunidades plenamente neolíticas, que se expanden al interior de la Península en un lapso de tiempo relativamente corto. Hacia finales del sexto milenio, Andalucía, la meseta central, el valle del Ebro y amplias zonas de Portugal son testigos del asentamiento de grupos de agricultores y ganaderos.

Es probable que en algunas áreas de la Península, como en la cornisa cantábrica, las formas de vida de los cazadores-recolectores se mantuvieran durante unos cuantos siglos más; se neolitizaron de forma progresiva, en una fase posterior, a lo largo del quinto milenio. Se trataba de zonas con amplios recursos para la depredación y menos apetecibles para las exigencias de la economía neolítica.

Causas del neolítico

Hasta ahora, hemos tratado el dónde y el cómo del origen del Neolítico, dejando para el final la pregunta más importante y difícil de contestar: ¿por qué? Hasta los años treinta del siglo XX la cuestión pareció superflua. El progreso que supone la economía de producción frente a la depredación fue un logro del espíritu de superación del ser humano. Sin embargo, la respuesta no era tan sencilla. Es difícil suponer que los cazadores-recolectores que comenzaron las primeras experiencias agrícolas fueran conscientes de las implicaciones que su comportamiento iba a tener. Además, los estudios etnográficos sobre cazadores-recolectores llevados a cabo durante los años sesenta demostraron que no se trata de sociedades precarias; mientras haya un equilibrio entre población y recursos, son formas de vida satisfactorias.



9. HOZ NEOLITICA ENCONTRADA EN LA DRAGA, Bañolas. El vástago transversal de madera servía para acopiar los tallos de cereal, que se sujetaban con la mano libre mientras se cortaban con la lámina de sílex que estaba insertada en la ranura que se observa en la mitad del instrumento. Este tipo de hoces sólo se conocen en el cuadrante noroccidental de la Península.

La explicación de las causas del Neolítico constituye un tema controvertido. Algunos investigadores han recurrido a la posible existencia de desequilibrios entre población y recursos para justificar el cambio. Así, se ha propuesto que los abruptos cambios climáticos que acontecieron con el Dryas Final, entre 11.200 y 9500 a.C., hacia un clima más frío y seco, hicieron que los grupos natufienses tuvieran que comenzar a cultivar los cereales como medio de mantener un recurso que comenzaba a escasear en su forma silvestre. Otros investigadores han señalado factores de aumento de población entre los últimos grupos de cazadores-recolectores como el motor que forzó el tránsito.

En las últimas décadas se han propuesto causas de orden social o religioso. Así, se plantea que una serie de líderes sociales que aparecieron entre los últimos cazadores-recolectores pudieron inducir a una intensificación de la producción mediante la agricultura y la ganadería. También se ha sugerido que los cambios económicos estuvieron precedidos de nuevas creaciones en el universo religioso y que fueron estos cambios en las formas de pensamiento los que permitieron la domesticación de lo salvaje.

En cualquier caso, resida la causa en uno de esos factores o en la combinación de varios de ellos, lo que sí parece cierto es que las condiciones económicas, sociales y de pensamiento que llevaron a la economía de producción se dieron en diversas áreas del mundo en un lapso de tiempo hasta cierto punto corto, entre el décimo y el quinto milenio a.C., pues sólo así se puede explicar que los cambios tuvieran lugar en diversos focos independientes y que se transmitieran a amplias áreas geográficas con suma rapidez.

Bibliografía complementaria

THE NATUFIAN CULTURE IN THE LEVANT. Dirigido por O. Bar-Yosef y F. R. Valla. International Monographs in Prehistory; Ann Arbor, 1992.

AL OESTE DEL EDEN. LAS PRIMERAS SOCIEDADES AGRICOLAS EN LA EUROPA MEDITERRANEA. J. Bernabeu, J. E. Aura y E. Badal. Síntesis; Madrid, 1993.

THE ORIGINS AND SPREAD OF AGRICULTURE AND PASTORALIM IN EURASIA. Dirigido por D. H. Harris. University College of London Press; Londres, 1996.

NAISSANCE DES DIVINITES, NAISSANCE DE L'AGRICULTURE. LA REVOLUTION DES SYMBOLES AU NEOLITHIQUE. J. Cauvin. CNRS Editions (Empreintes). Nouvelle édition corrigée et augmentée; París, 1997.

LE SITE NEOLITHIQUE DE TELL MUREYBET. EN HOMMAGE A JACQUES CAUVIN. Dirigido por J. J. Ibáñez. *British Archaeological Reports International Series*, n.º 1843. Archaeopress; Oxford, 2008.

EL ORIGEN DE LA COMPUTACION

MARTIN CAMPBELL-KELLY

La era de la información comenzó al descubrir que con las máquinas podía emularse capacidades de la mente

De acuerdo con su historia canónica, la evolución del computador ha sido breve y rápida. Se inició durante la Segunda Guerra Mundial con gigantescas máquinas de laboratorio, prosiguió con ordenadores de sobremesa merced al imparable avance de los microcircuitos, y la ley de Moore que lo predecía, y desemboca en Microsoft, agigantada gracias a los sistemas operativos. Aparecen, por último, dispositivos pequeños y muy económicos, con capacidad para comprar y vender acciones o para difundir imágenes de vídeo por todo el mundo. Esta es sólo una forma de abordar la historia de la computación: siguiendo la evolución de la electrónica de estado sólido desde hace 60 años.

Pero la computación es muy anterior a los transistores. En tiempos remotos, los astrónomos ya sabían predecir los movimientos de las estrellas y los griegos dedujeron la forma y las dimensiones de la Tierra. Se sumaban los tributos y se cartografiaban las distancias. No obstante, el cálculo seguía en manos humanas. Era aritmética, una destreza equiparable a la lectura o la escritura, que mejoraba la comprensión del mundo.

Al desaparecer esa limitación, empezó la época del cálculo automático. Primero vinieron las máquinas sumadoras y cajas registradoras; hubo también un gran afán de organizar los cálculos matemáticos según lo que hoy llamamos "programas". La idea de programa se remonta a los años treinta del siglo XIX, un siglo antes de los días en que acostumbra a fecharse el nacimiento del computador. De los primeros computadores electrónicos, creados durante la Segunda Guerra Mundial, nació lo que vino a llamarse "computador universal": una máquina capaz de cualquier tipo de tratamiento de la información, incluida la manipulación de sus propios programas. Esos son los ordenadores de los que tanto depende el mundo de hoy.

Sin embargo, pese a haber madurado la técnica hasta el punto de volverse omnipresente y de parecer ilimitada, se sigue intentando penetrar en los procesos mentales, biológicos y cuánticos para construir tipos de máquinas enteramente nuevos.

La máquina diferencial

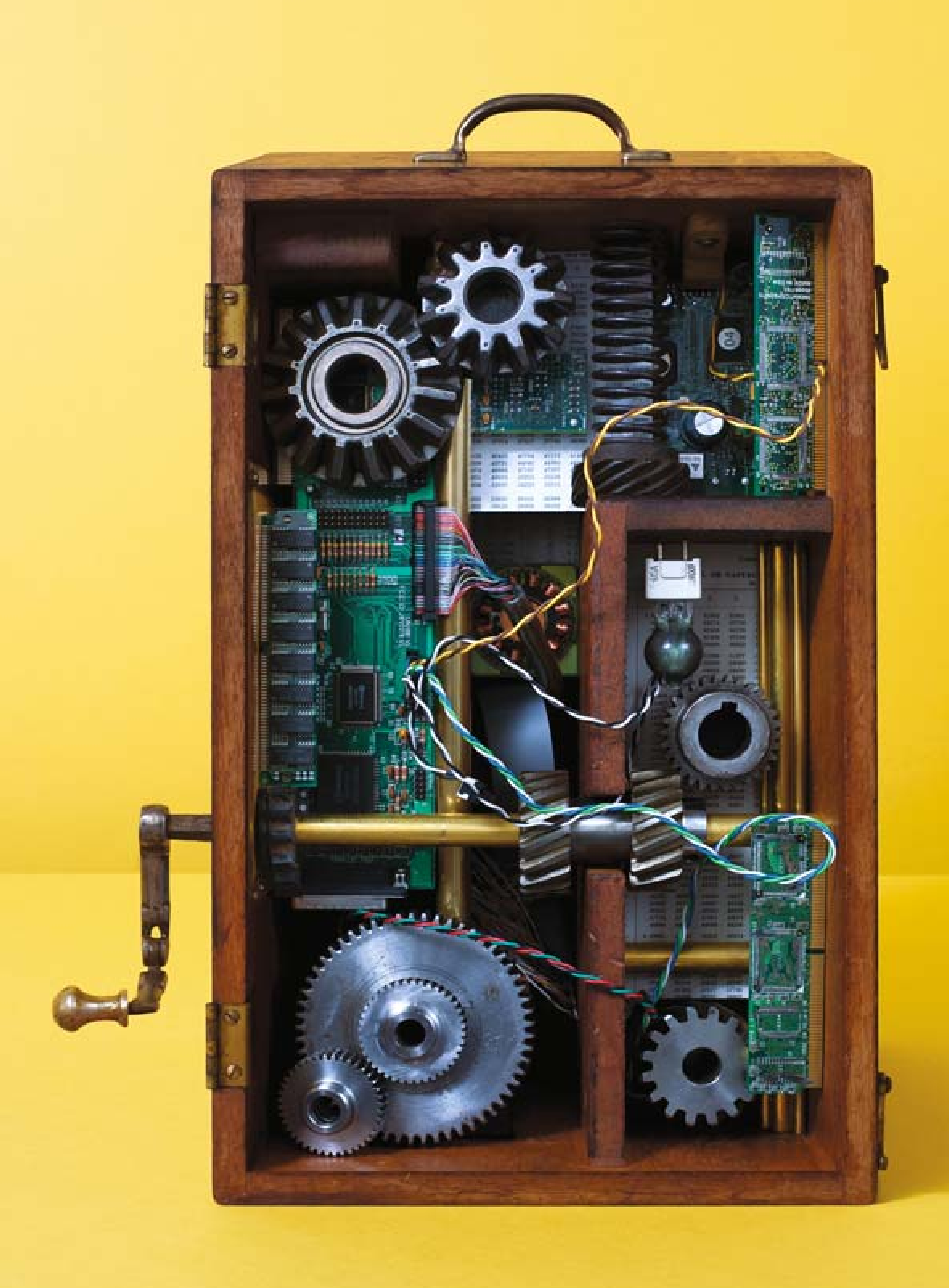
En 1790, poco después del inicio de la Revolución Francesa, el gobierno decidió que la República necesitaba nuevos mapas para implantar un sistema justo de impuestos a la propiedad. Asimismo, ordenó la sustitución del sistema antiguo de pesas y medidas por el sistema métrico decimal. Como instrumento para que los matemáticos e ingenieros acometieran ese cambio, la Oficina Catastral francesa encargó la preparación de un nuevo conjunto de tablas matemáticas.

Pero en el siglo XVIII todos los cálculos se hacían a mano. Una "mano de obra" de 60 a 80 personas sumaba y restaba cantidades para rellenar, línea tras línea, las *Tables du Cadastre* solicitadas. No era un trabajo especializado; sólo exigía saber leer, escribir y contar. De hecho, casi todos los operarios eran peluqueros que se habían quedado en paro: los peinados aristocráticos amenazaban

CONCEPTOS BASICOS

- Los primeros "computadores" fueron personas (individuos o grupos) que tediosamente sumaban números a mano para rellenar tablas de artillería.
- Inspirado por el trabajo de un grupo de calculadores en la Francia revolucionaria, el matemático británico Charles Babbage creó el primer dispositivo mecánico capaz de sistematizar los cálculos.
- Los primeros computadores modernos aparecieron en la década de los cincuenta: eran máquinas que podían utilizar el resultado de los cálculos para alterar sus instrucciones de funcionamiento.

HOLLY LINDEM (*fotoilustración*); GENE BURKHARDT (*diseño*)

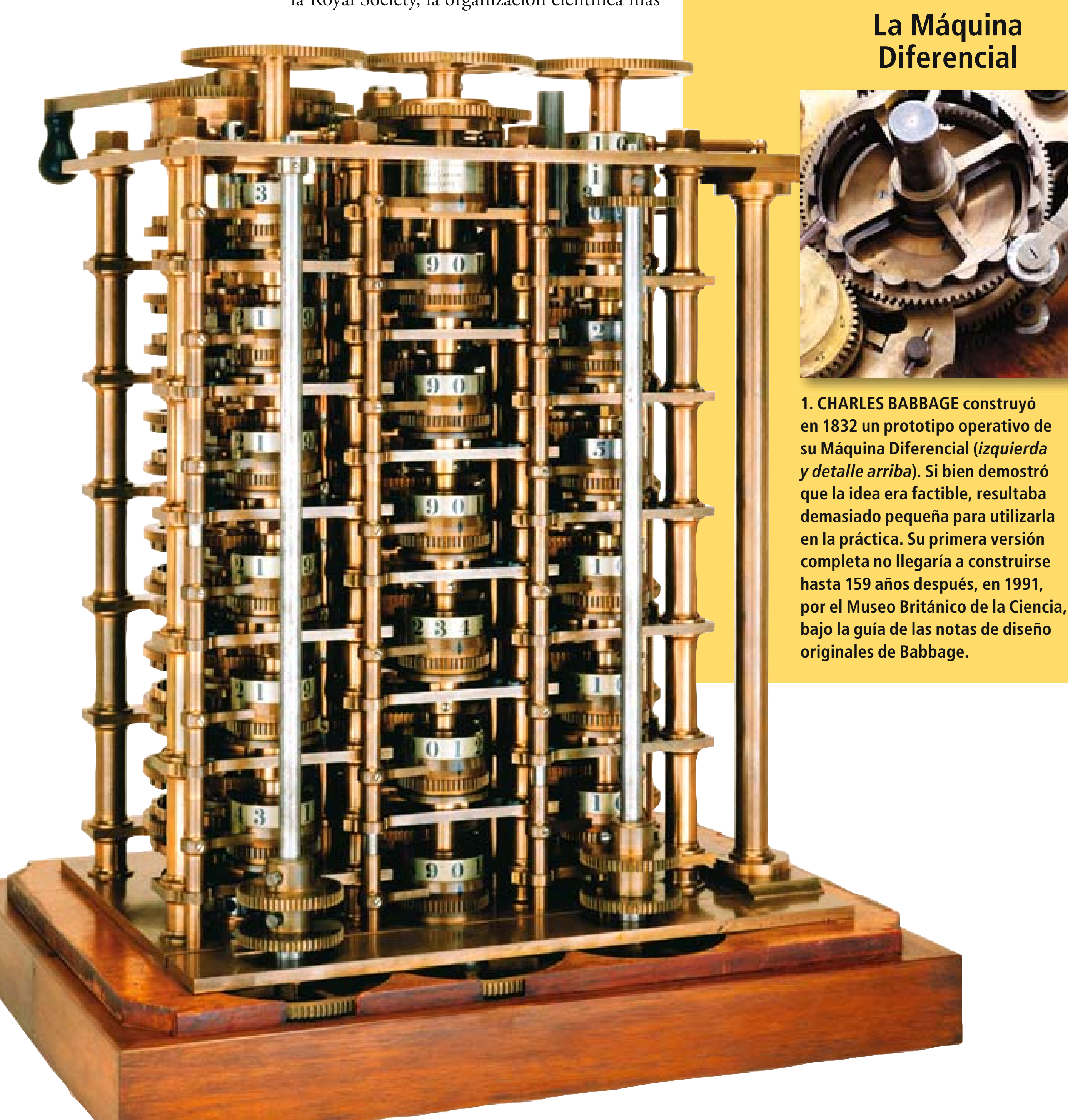


el cuello de sus portadores en aquella Francia revolucionaria.

El proyecto tardó unos diez años en completarse, pero, para entonces, la República, sacudida por las guerras, carecía de los fondos necesarios para publicarlo. El manuscrito languideció en la Académie des Sciences durante decenios. En 1819, Charles Babbage, joven matemático británico, pudo ver el documento en una visita a París. Tenía entonces 28 años; tres años antes había sido elegido miembro de la Royal Society, la organización científica más importante de Gran Bretaña. Además, estaba muy al tanto de los computadores humanos: había supervisado personalmente la confección de tablas astronómicas y actuariales.

A su regreso, Babbage decidió repetir el proyecto francés, pero con máquinas en lugar de personas. Inglaterra sufría entonces las convulsiones de la Revolución Industrial: los trabajos antes encomendados a la fuerza humana o animal se rendían ante la eficacia

La Máquina Diferencial



1. CHARLES BABBAGE construyó en 1832 un prototipo operativo de su Máquina Diferencial (*izquierda y detalle arriba*). Si bien demostró que la idea era factible, resultaba demasiado pequeña para utilizarla en la práctica. Su primera versión completa no llegaría a construirse hasta 159 años después, en 1991, por el Museo Británico de la Ciencia, bajo la guía de las notas de diseño originales de Babbage.

CORTESIA DE SCIENCE MUSEUM (*máquina diferencial*); SCIENCE MUSEUM/SSPL (*inserto*)

de la máquina. Babbage apreció el poder de la mecanización y comprendió que no sólo podía reemplazarse a los músculos, sino también a la mente.

Así pues, en 1822, presentaba la propuesta de la que llamó Máquina Calculadora y en 1824 conseguía que el gobierno la financiara. En el decenio siguiente se implicó personalmente en busca de las mejores técnicas para su máquina.

El de 1832 fue el *annus mirabilis* de Babbage. Produjo entonces un modelo operativo de su máquina (al que llamó Máquina Diferencial); publicó, además, su obra clásica *Economy of Machinery and Manufactures*, que asentó su reputación como economista industrial en el mundo entero. En Londres, en su casa de Dorset Street, convocaba reuniones a las que asistía la crema de la sociedad. Allí exhibía la Máquina Diferencial para que sirviese de tema de conversación.

Un año después, Babbage abandonó la Máquina Diferencial en pro de una idea más grandiosa: la Máquina Analítica. La primera se había dedicado exclusivamente a la confección de tablas; esta otra, en cambio, tendría que realizar cálculos matemáticos cualesquiera. Como los ordenadores modernos, comprendería un procesador aritmético (el "molino"), una memoria que retendría los números (el "almacén") y medios para que el usuario modificara su operación, en este caso tarjetas perforadas. En resumen, era un computador diseñado con técnicas de la era victoriana.

No fue, sin embargo, bien acogida la decisión de abandonar incompleta la Máquina Diferencial; el gobierno puso trabas a la concesión de nuevos fondos. Sin desanimarse, Babbage preparó miles de descripciones detalladas y esquemas de la máquina con la esperanza de poder conseguir algún día la financiación. Pero hasta la década de los setenta del siglo pasado, bien entrados en la era informática, no se estudiaron esos documentos. Uno de quienes se dedicaron a ello señaló que la Máquina Analítica parecía un computador diseñado en otro planeta.

Los años oscuros

Babbage concibió, en esencia, una computación digital. Igual que los aparatos actuales, esas máquinas manipulaban números (dígitos) con arreglo a un conjunto de instrucciones y producían un resultado numérico preciso.

Tras el fracaso de Babbage, la computación entró en los que el matemático inglés L. J. Comrie llamó "años oscuros" del cálculo digital, que se prolongaron hasta la Segunda Guerra Mundial. En esos tiempos, el cálculo mecánico se realizaba con computadores analógicos. Consistían en un modelo mecánico del sistema. Si, por ejemplo, se deseara predecir por medios digitales el momento en que va a ocurrir un eclipse solar, habría que hallar soluciones numéricas de las leyes de movimiento de Kepler.

Antes de aparecer los computadores digitales, la única manera práctica de conseguirlo era el cálculo manual. (Desde finales del siglo XIX a los años cuarenta del XX, el Observatorio de Harvard empleó para ello un grupo femenino de calculadoras.) Pero también podría crearse con ese fin un computador analógico: un modelo de sistema solar construido con ejes y engranajes que se "anticiparían" al futuro (*véase el recuadro* "El computador analógico").

Antes de la Segunda Guerra Mundial, el instrumento de cálculo analógico más importante era el Analizador Diferencial, que Vannevar Bush construyó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1929. En aquel tiempo se invertía masivamente en electrificación rural; Bush investigaba sobre transmisión eléctrica. Eran problemas que podían formularse en ecuaciones diferenciales ordinarias, pero que costaba mucho tiempo resolver. El Analizador Diferencial proporcionaba una solución aproximada sin necesidad de tratamiento numérico.

La máquina era de gran tamaño —ocupaba un laboratorio entero— y parecía uno de los "grandes inventos del TBO", llena de engranajes y árboles giratorios. Para "programar" el sistema había que conectar sus diversos componentes con destornilladores, llaves inglesas y martillos de plomo. Pese a lo laborioso del montaje, una vez terminado, el aparato podía resolver en cuestión de minutos ecuaciones que a mano llevaban días enteros. En EE.UU. e Inglaterra se construyó una docena de ejemplares de la máquina.

Una de esas máquinas pertenecía al Campo de Pruebas Aberdeen del ejército estadounidense, en Maryland; allí se realizaba la puesta a punto del armamento de campaña. Para que una pieza de artillería apuntase a un blanco a distancia conocida, los soldados tenían que fijar los ángulos vertical y horizontal (elevación y azimut) del cañón, de tal manera que el proyectil disparado siguiera la trayectoria parabólica deseada: primero hacia el cielo y luego cayendo hacia el blanco. Dichos ángulos los obtenían de una tabla de tiro que registraba numerosos valores correspondientes a diversas distancias y condiciones operativas.

Cada asiento en la tabla exigía integrar una ecuación diferencial ordinaria, labor que consumía de dos a tres días cuando se hacían todos los cálculos a mano. El Analizador Diferencial lo hacía en unos 20 minutos.

TRABAJO EN EQUIPO



Los calculadores humanos del Observatorio de Harvard, en una fotografía de alrededor de 1890, examinaron cientos de miles de placas fotográficas entre 1880 y 1920, para clasificar las estrellas por su color, posición y brillo.

El autor

Martin Campbell-Kelly, profesor del departamento de ciencias de computación de la Universidad de Warwick, es especialista en historia de la computación.

Todo cambia

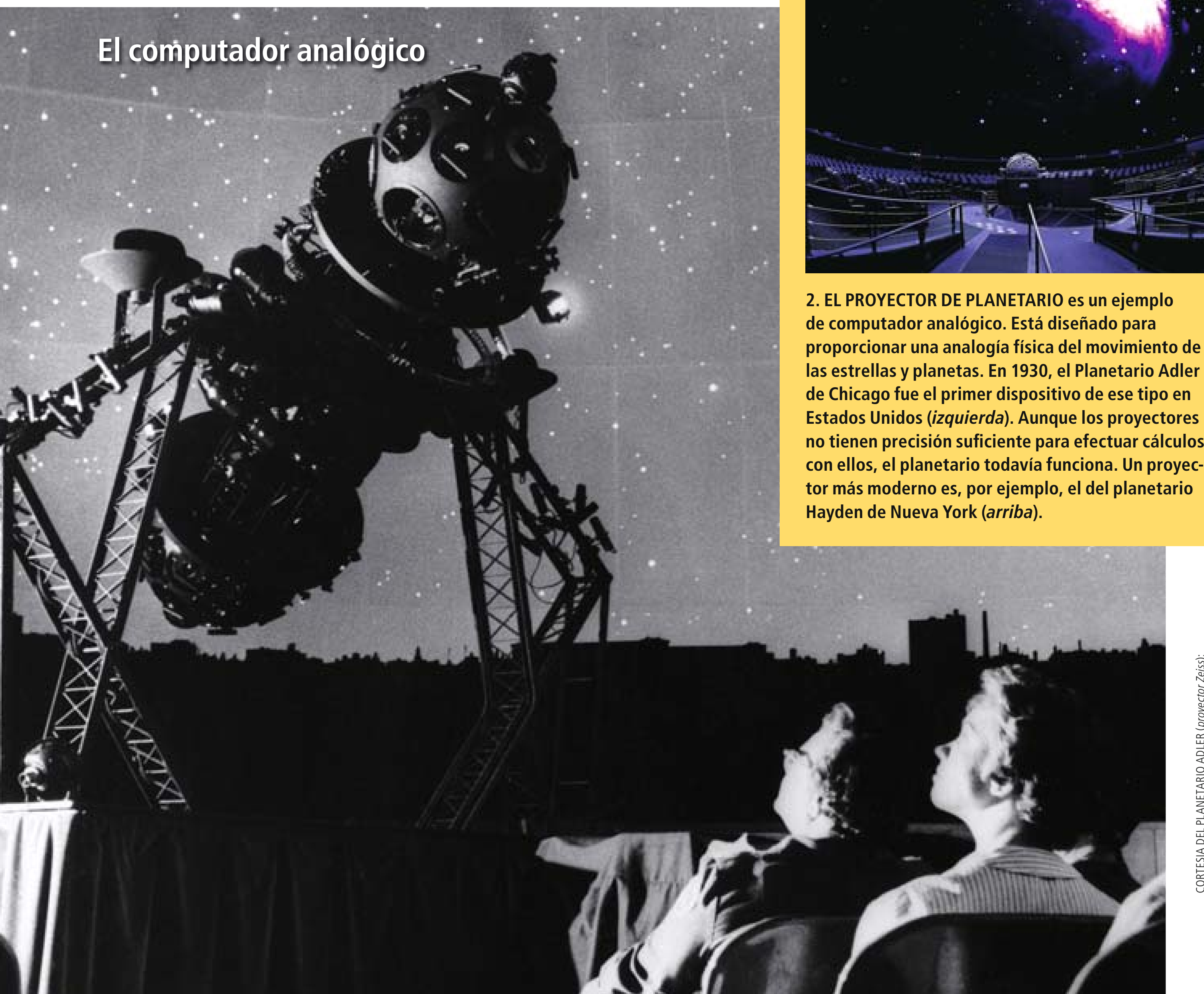
El 7 de diciembre de 1941, el ejército japonés atacó la base de la Armada estadounidense en Pearl Harbour. La inmediata movilización de EE.UU. exigió cada vez más tablas de tiro, cada una de ellas con cerca de 3000 asientos. Pese al analizador diferencial, en Aberdeen se acumulaban los cálculos pendientes.

La Escuela Moore de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Pennsylvania, a unos 130 kilómetros por la carretera de Aberdeen, contaba con su propio Analizador Diferencial. En la primavera de 1942, un instructor de esa escuela, John W. Mauchly, ideó una manera de acelerar los cálculos: construir un "computador electrónico" que utilizara tubos de vacío en vez de componentes mecánicos. La mente teórica de Mauchly encontró su complemento en un joven y activo investigador de la escuela, J. Presper ("Press") Eckert, que ya presentaba atisbos de genialidad en ingeniería.

Al año de que Mauchly formulase su propuesta original, tras diversos retrasos accidentales y burocráticos, la idea le llegó al teniente Herman Goldstine, de 30 años, doctor en matemáticas por la Universidad de Chicago, oficial de enlace técnico entre Aberdeen y la Escuela Moore. En cuestión de días, Goldstine obtuvo luz verde para el proyecto. El 9 de abril de 1943, día en que Eckert cumplía 23 años, se inició la construcción del ENIAC (Calculador Integrador Numérico Electrónico, por sus siglas en inglés).

Muchos ingenieros manifestaron serias dudas sobre las posibilidades de éxito del ENIAC. Se daba por supuesto que la vida útil de un tubo de vacío rondaba las 3000 horas, y ENIAC en su versión inicial contenía 5000 tubos. Con esa tasa de fallos, la máquina no podría funcionar más de unos pocos minutos seguidos. Eckert, sin embargo, comprendió que los tubos tendían a fallar por las repetidas

El computador analógico



2. EL PROYECTOR DE PLANETARIO es un ejemplo de computador analógico. Está diseñado para proporcionar una analogía física del movimiento de las estrellas y planetas. En 1930, el Planetario Adler de Chicago fue el primer dispositivo de ese tipo en Estados Unidos (*izquierda*). Aunque los proyectores no tienen precisión suficiente para efectuar cálculos con ellos, el planetario todavía funciona. Un proyector más moderno es, por ejemplo, el del planetario Hayden de Nueva York (*arriba*).

operaciones de apagar y encender: por esa razón las emisoras de radio nunca apagaban sus tubos de transmisión. Si los tubos funcionaran a un voltaje bastante inferior al nominal, durarían todavía más. (Cuando la máquina se completó, el número total de tubos ascendió hasta 18.000.)

Eckert y su equipo completaron el ENIAC en dos años y medio. La máquina terminada era toda una hazaña de ingeniería, un mastodonte de 30 toneladas que consumía 150 kilowatt de potencia. Podía realizar 5000 sumas por segundo y calcular una trayectoria en menos tiempo del que tarda el proyectil en llegar a su objetivo. Además, era un gran ejemplo del papel que a menudo desempeña el azar en la invención: aunque la Escuela Moore no era entonces un centro investigador puntero en computación, se encontraba en el lugar adecuado, el momento era el oportuno y contaba con las personas idóneas.

El ENIAC, sin embargo, no se terminó hasta 1945, demasiado tarde para apoyar el esfuerzo bélico. Por otro lado, sólo podía almacenar 20 números a la vez y su programación requería días de manipular un entramado de cables que recordaban el interior de una central telefónica de alto tráfico. Además, su diseño sólo le permitía resolver ecuaciones diferenciales ordinarias. Otros problemas, como los del Proyecto Manhattan, exigían resolver ecuaciones en derivadas parciales.

John von Neumann era asesor del Proyecto Manhattan cuando conoció el ENIAC en una visita a Aberdeen durante 1944. Nacido en 1903 de una acomodada familia de banqueros húngaros, fue un niño prodigio de las matemáticas; completó sus estudios a edades más tempranas de lo habitual, hasta convertirse a los 23 años en el *privatdozent* (un docente de una universidad alemana que aún no es profesor titular) más joven de la historia de la Universidad de Berlín. En 1930 emigró a EE.UU., donde sería, junto con Albert Einstein y Kurt Gödel, uno de los primeros miembros del Instituto para Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey. En 1937 se nacionalizó estadounidense.

Von Neumann comprendió muy pronto el poder de la computación electrónica. Algunos meses después de su visita a Aberdeen se reunía con Eckert, Mauchly, Goldstine y Arthur Burks —instructor también de la Escuela Moore— para diseñar una máquina sucesora: el Computador Automático Electrónico de Variable Discreta (EDVAC).

Las mejoras que aportaba la nueva máquina eran abismales. Von Neumann introdujo las ideas y la nomenclatura de Warren McCullough y Walter Pitts. Estos neurocientíficos habían desarrollado una teoría sobre las operaciones lógicas del cerebro (de donde procede que hablemos de "memoria" del ordenador). Igual que Von Neumann, McCullough y Pitts estaban influidos por los estudios teóricos que el matemático británico Alan Turing realizó a finales de los años treinta del siglo pasado; demostró que una máquina sencilla podía ejecutar una enorme variedad de tareas complejas. Fue por entonces cuando mutó el punto de vista colectivo: se pasó a considerar que el computador, hasta entonces un mero instrumento matemático, era una máquina universal procesadora de información.

Von Neumann distinguió en la máquina cinco partes esenciales: la memoria, que no sólo almacenaba datos numéricos, sino instrucciones operativas; la unidad aritmética, que realizaba los cálculos; el "órgano" de entrada que permitía la transferencia de programas y datos a la memoria; el órgano de salida que registraba los resultados de la computación; y, por último, la unidad de control, coordinadora de las operaciones.

Esta arquitectura posibilita modificar el programa del computador sin alterar la disposición física de la máquina. Por añadidura, el programa podía manipular sus propias instrucciones. Esta característica no sólo permitiría a Von Neumann resolver sus ecuaciones en derivadas parciales; aportaría también una gran flexibilidad, verdadero núcleo de la ciencia de la computación.

En junio de 1945 Von Neumann redactó en nombre del grupo su clásico *First Draft of*



3. EL ENIAC supuso la entrada de la computación en la era electrónica. Lo inventaron J. Presper Eckert y John W. Mauchly, de la Escuela Moore de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Pennsylvania. Utilizaba tubos de vacío para almacenar números y consumía una potencia de 150 kilowatt, equivalente a más de 1000 PC modernos.

BETTMANN/CORBIS

FUTURO DE LA ARQUITECTURA DEL COMPUTADOR

El computador de programa almacenado ha sido la base de la técnica de la computación desde los años cincuenta del siglo pasado. ¿Qué cabe esperar ahora?

QUBITS: El computador cuántico, tan ensalzado, explota la posibilidad de que una partícula esté en muchos estados a la vez y realiza operaciones cuánticas simultáneas en todos esos estados.

RED NEURONAL: Son sistemas formados por multitud de nodos procesadores sencillos, interconectados de modos particulares. El sistema entero tiene un comportamiento complejo a nivel global.

MATERIA ORGANICA: Los computadores basados en hebras de ADN o ARN procesan datos codificados en material genético.

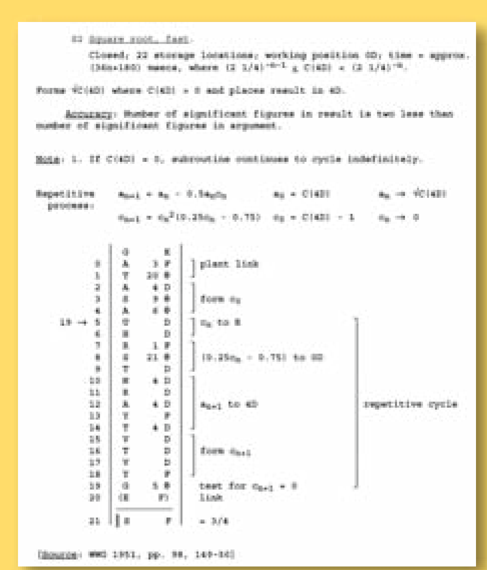
La Máquina Analítica parecía un computador diseñado en otro planeta.

a Report on the EDVAC [Primer borrador de un informe sobre el EDVAC]. Pese a tratarse de un borrador, enseguida circuló entre los conocedores de la materia. Tuvo dos consecuencias. La primera, que nunca hubo un segundo borrador, y la segunda, que Von Neumann se llevó casi todo el crédito.

Evolución de la máquina

La difusión social del computador en los sesenta años siguientes es una larga historia que no procede contar aquí. Quizás el desarrollo más notable sea que una máquina diseñada originalmente para cálculos matemáticos resulte infinitamente adaptable y tenga usos muy diferentes, desde el procesamiento de datos empresariales hasta la computación personalizada y la construcción de una red de información mundial.

Podemos considerar que el desarrollo del computador ha seguido tres direcciones: equipo físico (*hardware*), soporte lógico (*software*) y arquitectura. Los progresos del equipo físico durante los últimos 60 años son ya legendarios. Los voluminosos tubos electrónicos dejaron paso en los años cincuenta a transistores "discretos" (transistores soldados individualmente en el lugar correspondiente del circuito). A mediados de los sesenta se integran en un "chip" de silicio microcircuitos con algunos transistores (luego cientos, más tarde miles). A principios de los setenta, se desarrolla el microprocesador, que concentra en un solo



```
S3 Square root, fast.
   Closed; 22 storage locations; working position 6D; time = approx.
   (36n+180) msecs, where (2 1/4)^(-n-1) ≤ C(4D) < (2 1/4)^(-n).

Forms √C(4D) where C(4D) > 0 and places result in 4D.

   Accuracy: Number of significant figures in result is two less than
number of significant figures in argument.

Note: 1. If C(4D) = 0, subroutine continues to cycle indefinitely.

Repetitive   a(n+1) = a(n) - 0.5a(n)c(n)          a(0) = C(4D)       a(n) → √C(4D)
  process:
             c(n+1) = c(n)²(0.25c(n) - 0.75)   c(0) = C(4D) - 1   c(n) → 0

           |  G     K  |
        0  |  A   3 F  | ] plant link
        1  |  T  20 θ  |
        2  |  A   4 D  | ]
        3  |  S   9 θ  | ] form c(0)
        4  |  A   4 θ  | ]
  13 →  5  |  T     D  | ] c(n) to 0                                 ]
        6  |  H     D  |                                             ]
        7  |  S   1 F  | ]                                           ]
        8  |  S  21 θ  | ] (0.25c(n) - 0.75) to 0D                   ]
        9  |  T     D  | ]                                           ]
       10  |  V   4 D  | ]                                           ]
       11  |  R     D  | ]                                           ]
       12  |  A   4 D  | ] a(n+1) to 4D                              ] repetitive cycle
       13  |  T     F  | ]                                           ]
       14  |  T   4 D  | ]                                           ]
       15  |  V     D  | ]                                           ]
       16  |  T     D  | ] form c(n+1)                               ]
       17  |  V     D  | ]                                           ]
       18  |  T     F  | ]                                           ]
       19  |  G   5 θ  |   test for c(n+1) < 0                       ]
       20  | (E     F) |   link
           |-----------|
       21  | S      F  |   = 3/4

[Source: WWG 1951, pp. 98, 140-141]
```

4. EDSAC fue el primer computador práctico de programa almacenado. Lo construyeron en la Universidad de Cambridge Maurice Wilkes y William Renwick en 1949 (*abajo*). Los intentos de elaborar un sistema de programación simbólico (*arriba*) fueron un paso adelante hacia una manera sencilla de programar.

El computador de programa almacenado

POPPERFOTO/GETTY IMAGES (*EDSAC*); FUENTE: "THE EDSAC SIMULATOR PROGRAM DOCUMENTATION," DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE COMPUTACION, UNIVERSIDAD DE WARWICK (*inserto*)

chip la unidad de procesamiento entera de un computador. El microprocesador dio origen al PC (ordenador personal) y hoy permite controlar dispositivos de todo tipo, de aspersores a misiles balísticos.

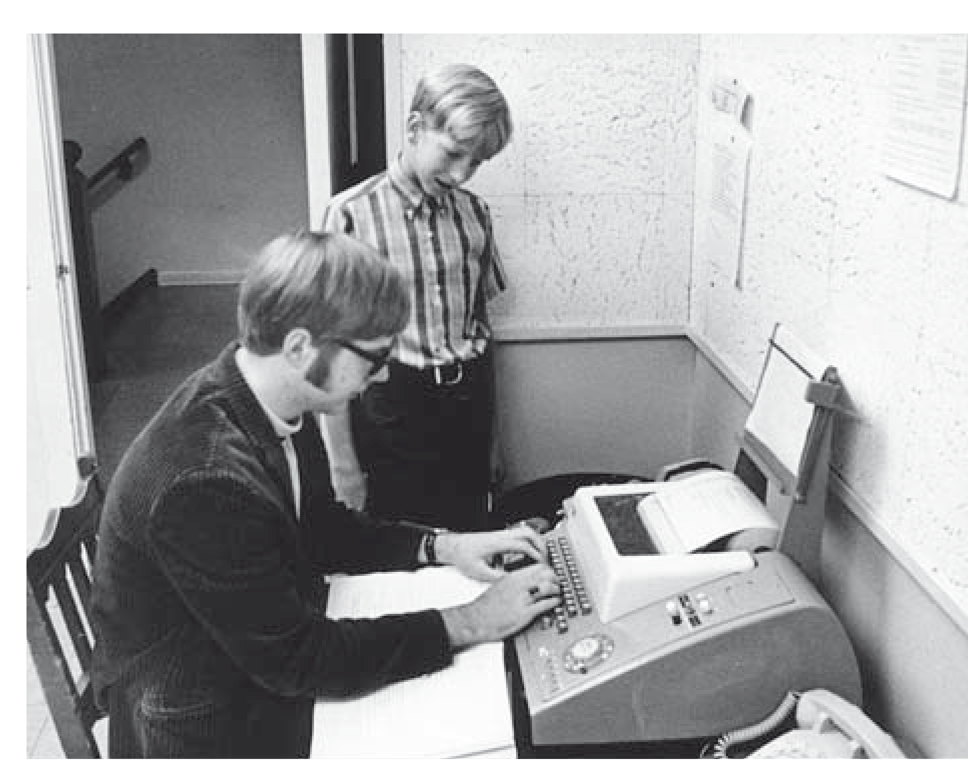
El soporte lógico planteó desafíos más sutiles. En 1947 y 1948, Von Neumann y Goldstine publicaron una serie de informes bajo el título de *Planning and Coding Problems for an Electronic Computing Instrument* [Problemas de codificación y planificación de un instrumento computador electrónico], en los que se establecían docenas de rutinas para los cálculos matemáticos, con la confianza de que cualquier modesto "programador" fuese capaz de convertirlas en programas ejecutables. Pero eso no fue posible. El proceso de codificar programas y lograr su ejecución resultaba de una dificultad extrema. Quien antes lo descubrió fue Maurice Wilkes, de la Universidad de Cambridge, que había creado el EDSAC, el primer computador de programa almacenado práctico (*véase el recuadro* "El computador de programa almacenado"). En sus memorias recuerda con pesar el momento de 1949 en que vio con toda claridad que iba a gastar gran parte de su vida posterior en depurar de errores sus propios programas.

Junto con otros investigadores de Cambridge, Wilkes desarrolló un método para escribir instrucciones de computación en una forma simbólica que facilitase la tarea y aumentara su inmunidad a los errores. El computador aceptaría este lenguaje simbólico y lo transformaría en código binario. IBM introdujo en 1957 el lenguaje de programación Fortran, que simplificó enormemente la escritura de programas científicos y matemáticos.

En el Colegio Dartmouth, el profesor John G. Kemeny y el informático Thomas E. Kurtz inventaron en 1964 Basic, lenguaje de programación sencillo y potente, destinado a democratizar la computación y acercarla a quienes aún no habían finalizado sus estudios universitarios. Con Basic, hasta colegiales, como Bill Gates era por entonces, podían empezar a escribir sus propios programas.

Por el contrario, la arquitectura computacional, es decir, la disposición lógica de los subsistemas que componen un computador, apenas ha evolucionado. Casi todas las máquinas hoy en uso adoptan la arquitectura general del computador de programa almacenado de 1945. La situación recuerda la del automóvil propulsado por motor de gasolina: a través de los años proliferan los refinamientos técnicos y las mejoras de rendimiento, pero a grandes rasgos el diseño básico permanece. Y aunque pudiera concebirse un dispositivo radicalmente mejor, en ambos casos se ha alcanzado el estado que los historiadores de la técnica llaman "clausura". A través de decenios, las inversiones han dado resultados tan excelentes que nadie se siente obligado a invertir en otras alternativas. Quedan, no obstante, multitud de posibilidades de evolución radical. En los años ochenta se despertó un amplio interés por las máquinas de procesamiento masivo en paralelo: en ellas había miles de computadores elementales trabajando simultáneamente. Todavía se utiliza esa arquitectura básica para trabajos que requieren computación intensa, como la predicción meteorológica y la investigación de armas nucleares. También se ha buscado inspiración en el cerebro humano: hoy sabemos que contiene centros de procesamiento especializados para distintas tareas, tales como el reconocimiento de fisonomías o la comprensión del habla. Los científicos están aprovechando varias de esas ideas para concebir "redes neuronales", útiles, por ejemplo, para la identificación de placas de matrícula y el reconocimiento del iris.

Otras investigaciones, más visionarias, quieren construir computadores a partir de materia orgánica, del ADN [*véase* "Computadores de ADN", por Ehud Shapiro y Yaakov Benenson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio 2006], y computadores que saquen partido del misterio del mundo cuántico [*véase* "Los límites de la computación cuántica", por Scott Aaronson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo 2008]. Nadie sabe el aspecto que tendrán los computadores dentro de 50 años. Tal vez lleguen a sobrepasar los poderes mentales de quienes los crearon.



5. LOS LENGUAJES DE PROGRAMACION SENCILLOS, como Basic, permitieron que la redacción de programas estuviera al alcance de las masas. Un joven Paul Allen (*sentado*) y su amigo Bill Gates trabajan en un terminal de teletipo conectado por línea telefónica a un computador que ocupaba una sala entera.

Bibliografía complementaria

THE DIFFERENCE ENGINE: CHARLES BABBAGE AND THE QUEST TO BUILD THE FIRST COMPUTER. Doron Swade. Penguin, 2002.

COMPUTER: A HISTORY OF THE INFORMATION MACHINE. Martin Campbell-Kelly y William Aspray. Westview Press, 2004.

THE MODERN HISTORY OF COMPUTING. Stanford Encyclopedia of Philosophy. http://plato.stanford.edu/entries/computing-history

Las cicloides y el conjunto de Mandelbrot

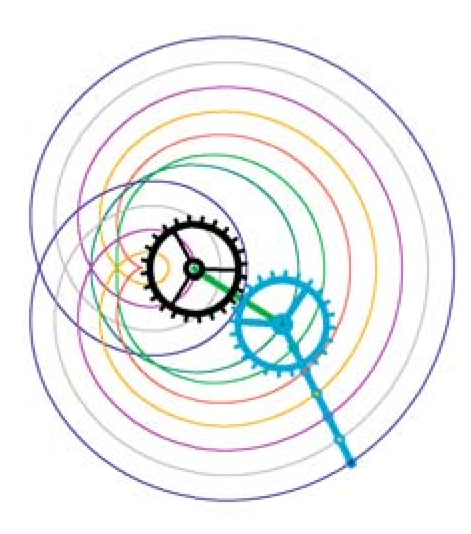
No sólo coinciden con el camino de la luz en las cáusticas, sino que aparecen también en el objeto más conocido de la geometría fractal

Norbert Treitz

Si una rueda dentada de radio *r* rueda por el exterior de otra, inmóvil, de radio *R*, cada uno de sus dientes (esto es, cada punto de su perímetro) describirá una curva que tendrá unas puntas características allá donde el diente toque la rueda estática. A esa curva se la llama epicicloide, porque el círculo en movimiento rueda "sobre" (en griego *epi*) el círculo inmóvil (*kyklos*, latinizado *cyclus*). En *Curiosidades de la física* de diciembre de 2008 ("La curva del corazón") contamos que una curva de este tipo puede también aparecer de una manera que no es mecánica: como cáustica ("curva focal") de un haz de luz que se refleja en el borde de un círculo. Conozcamos ahora otras propiedades sorprendentes de esas curvas.

La epicicloide tiene una pariente "introvertida": si la rueda inmóvil tiene los dientes orientados hacia dentro y en su interior rueda un engranaje dentado más pequeño, cada uno de los dientes de éste —a los que podemos imaginar con un lápiz sujeto— describirá una hipocicloide (del griego *hypo,* abajo). Ya nos hemos encontrado con estas curvas: serían los caminos óptimos de los metros intraterráqueos (véase *Curiosidades de la física*, febrero de 2007).

Podemos sustituir ambas ruedas dentadas por punteros (vectores) en el plano, uno a continuación del otro (es decir, sumados). El primer puntero, cuya longitud denominaremos *a*, tiene su extremo trasero fijo en el centro de la rueda inmóvil y la punta en el centro de la que se mueve; el segundo, de longitud *b*, va desde esa punta del primer puntero hasta la posición del lápiz. Así se cumple que $a = R + r$ y $b = r$. Las velocidades angulares de los punteros son inversamente proporcionales a sus longitudes. Si la razón $m = b/a$ es un número racional o un número entero, se obtendrá una curva cerrada que, si *m* no es entero, se cortará a sí misma varias veces. Con valores irracionales de *m,* la curva nunca llega a cerrarse.



1. Una rueda dentada (*azul claro*) que gira sobre una rueda dentada inmóvil del mismo tamaño (*negra*) traza diferentes curvas de limaçons ("caracoles"), según la parte de su radio (o de su prolongación) donde se encuentre el lápiz. Un lápiz en el perímetro de la rueda genera una cardioide (*rojo*).

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON DE NORBERT TREITZ/SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Para valores positivos de *m* resultan epicicloides; en particular, para $m = 2$ se tiene la cardioide (*figura 1*) y para $m = 3$, la nefroide. Las hipocicloides aparecen para valores negativos de *m*, con el caso especial del segmento rectilíneo para $m = -1$.

Las curvas generadas para valores enteros de *m* tienen una simetría rotacional de orden $(m - 1)$. Esto también vale para valores negativos de *m*: la deltoide de Steiner ($m = -2$) tiene una simetría de tres, la astroide ($m = -3$), de cuatro.

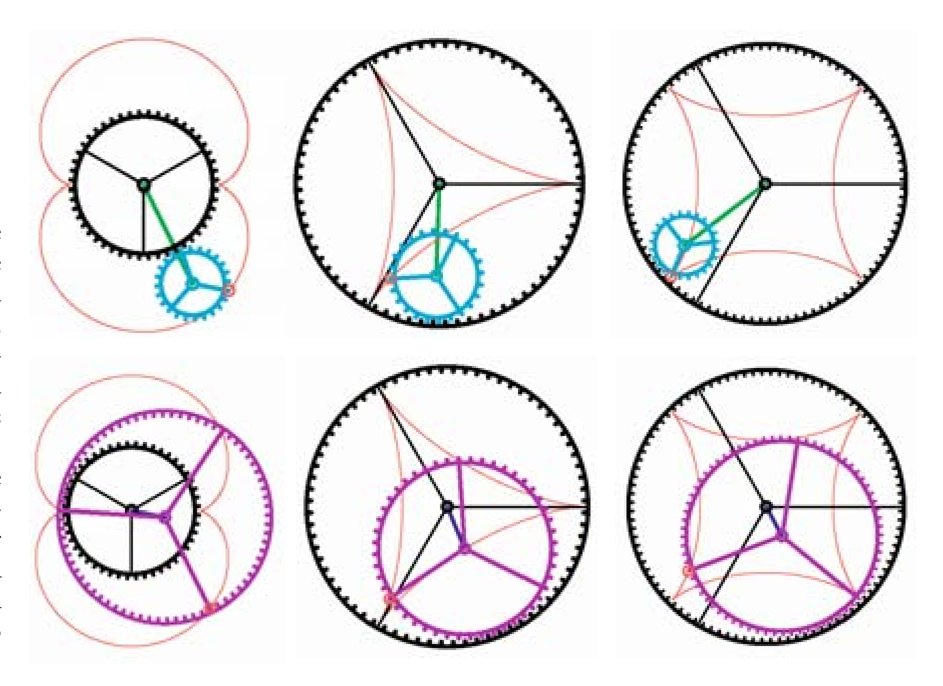
Para generar una epicicloide, el centro de la rueda móvil no tiene por qué estar fuera de la inmóvil. Se genera también con una gran rueda con dientes internos que encierre a su pareja inmóvil y la recorra como un aro de hula-hoop

El ajedrezado núcleo del conjunto de Mandelbrot

Las figuras aquí mostradas del clásico conjunto de Mandelbrot (*véase la figura, a la izquierda*) y de su generalización para $m = 4$ (*a la derecha*) se han construido según el proceso habitual en el caso de los puntos que caen fuera del conjunto (caso a): se determinó para cada punto *c* cuántas iteraciones se necesitaban para que la sucesión z_j sobrepasase un valor grande, determinado con anterioridad. Los puntos se coloreaban a continuación con gris claro u oscuro dependiendo de que ese número fuese par o impar. Cuando la iteración converge en un punto fijo (caso b), entonces z cae, para $m = 2$, dentro del círculo de radio 1/2 centrado en el origen. Este círculo está dividido por anillos de grosor 0,05 y por radios que pasan por el origen en 10 × 36 sectores anulares, que se colorean alternativamente de azul y azul oscuro, como un tablero de ajedrez de casillas curvadas o una diana con cuadrículas de lados curvos (*imagen pequeña*). El punto que corresponde al parámetro *c* se colorea así igual que el punto *z* al que converge la sucesión, si es que converge. De este círculo así ajedrezado resulta una superficie interna con cardioides, ajedrezadas y bastante deformadas. Para $m = 3$, de un círculo algo mayor resulta la nefroide. Para valores superiores de *m*, los bordes de las regiones de convergencia son igualmente epicicloides exactas.

Los otros colores indican puntos con convergencia cíclica. El orden *n* del ciclo se indica en el margen inferior con una aclaración para los colores; para $n > 11$ se usa el blanco.

2. Una misma epicicloide o hipocicloide puede generarse con dos pares de ruedas dentadas distintas (*de izquierda a derecha*: nefroide, deltoide y astroide).

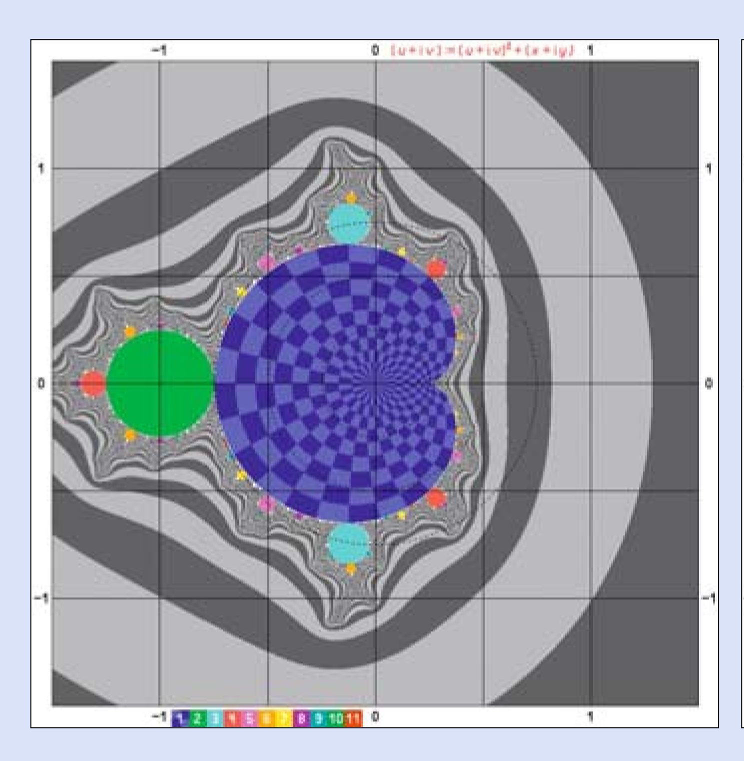


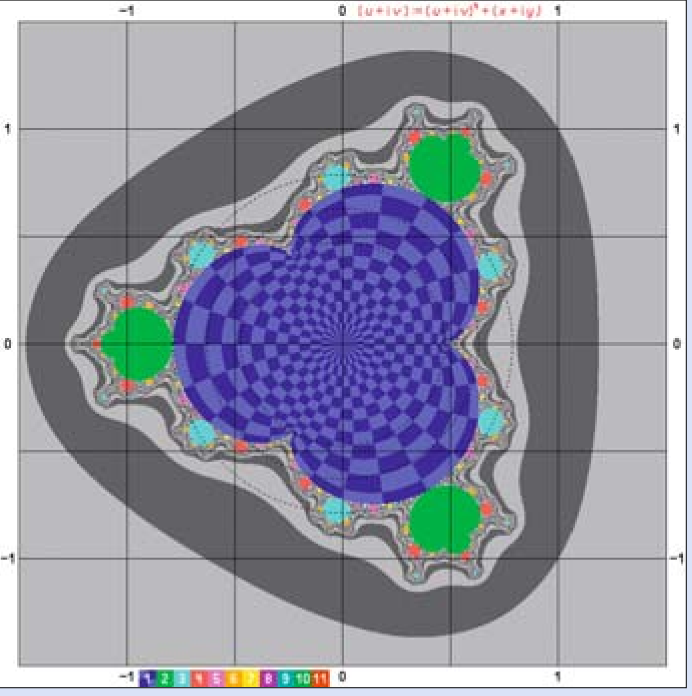
a una cintura. Eso sí, sería la cintura de alguien muy poco deportista, que no se moviese y estuviera hecho un barril (la cintura tendría una sección transversal circular). "Pericicloide" llaman a la curva así generada, pero no deja de ser una denominación superflua, pues no es más que una epicicloide.

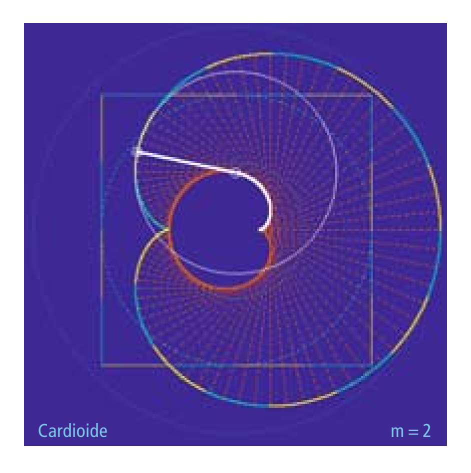
Podemos generar una hipocicloide de dos maneras distintas. No cabe distinguir en la curva trazada si en el interior de una rueda inmóvil de radio R gira una rueda dentada de radio r o si gira una de radio $R - r$ en sentido contrario (*figura 2*).

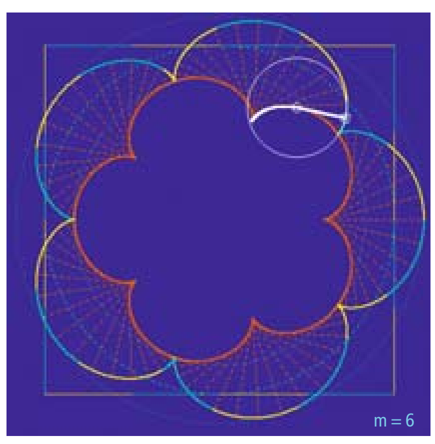
Las epitrocoides e hipotrocoides son generalizaciones de epicicloides e hipocicloides. Se trazan estas curvas cuando el lápiz no está en el perímetro de la rueda móvil, sino sobre el radio o una prolongación del radio. Epitrocoides e hipotrocoides se pueden generar también con dos punteros, disponemos de dos maneras de crearlas con ruedas dentadas. Cicloides y trocoides sin el prefijo epi o hipo son el trazo de un lápiz atado a una rueda que rueda sobre una recta. Desgraciadamente, las denominaciones no están unificadas. Algunos autores, entre ellos Gino Loria, el autor de la obra clásica sobre geometría de las curvas, hablan de "cicloides" en vez de "trocoides", por lo que ha de subdividir las cicloides de manera menos elegante.

La página web http://www.spektrum.de/KaustikAnim/ani.htm muestra una selección de la gran abundancia de estas clases de curvas (aunque está en alemán, no hace faltar saber esa lengua para entender las figuras y las animaciones). Todas las elipses se encuentran entre ellas, incluso las de semieje menor igual a cero —es decir, meros segmentos—; hay además círculos concéntricos y excéntricos, rhodoneas ("líneas con forma de rosas") que pasan por el origen y las









3. La epicicloide roja es la evoluta de la azul-amarillenta, y ésta, la envolvente de la roja. La línea gruesa blanca (el "hilo") tiene una parte tendida sobre el perímetro de la pequeña epicicloide y otra que forma el radio de los círculos de curvatura de la grande. Los trozos amarillos y azul claro del cuadrado alcanzan la misma longitud que los correspondientes trozos de curva.

curvas llamadas por Étienne Pascal (el padre del célebre Blaise) con el nombre de "limaçons", una vieja denominación francesa de los caracoles.

Evolutas y envolventes

Se fija un hilo en un punto de una curva, por ejemplo una epicicloide, se tensa el hilo a lo largo de un sector de la curva y se ata un lápiz al extremo libre del hilo. Si hacemos que el hilo, siempre igualmente tensado, se libere poco a poco de la curva, el trazo que marcará la punta del lápiz será una "envolvente" de la curva original. Como se puede escoger la longitud del extremo libre del hilo, existe una multitud infinita de envolventes de una curva.

De una envolvente B de una curva A se obtiene de nuevo A como el lugar geométrico de todos los centros de curvatura de B. La curva A se denomina entonces "evoluta" de B.

En el caso de las epicicloides (y también en las hipocicloides), la curva y la envolvente se parecen. Escojamos para un epicicloide de orden m (esto es, con $m - 1$ puntas) un hilo de longitud tal que cubra medio recorrido de una punta a la siguiente. Entonces, la envolvente será una versión agrandada de la curva original a escala $(m + 1):(m - 1)$ y girada respecto a ésta $1/(2m)$ de 360º (*figura 3*).

Manzanas y otras epicicloides en los conjuntos de Mandelbrot

La cardioide aparece de nuevo en otro sitio bien distinto: en la "manzana" que se ve en la representación gráfica del conjunto de Mandelbrot. Este conjunto, desde que en 1979 lo descubriera el matemático Benoît Mandelbrot mediante experimentos de ordenador, ha devenido algo así como el símbolo de la geometría fractal. Con sus infinitas puntillas que muestran nuevos detalles en cada ampliación, ofrece suficiente materia para toda una teoría. Limitémonos aquí a lo más necesario.

Se trata de la iteración de la función $f(z) = z^2 + c$ en el plano complejo. Los números complejos, en este caso z, c y $f(z)$, se pueden interpretar como parejas de números reales, que cabe representar en el plano. Una pareja (x, y) se escribe como $x + iy$, y a partir de ahí se calcula conforme a las reglas ordinarias, eso sí, teniendo en cuenta que $i^2 = -1$ (al número complejo i se le denomina unidad imaginaria).

Se escoge un punto z_0 del plano complejo ($z_0 = 0$ es una buena elección) y se le aplica la función f: $z_1 = f(z_0)$. Al resultado se le vuelve a aplicar la función, y así sucesivamente: $z_2 = f(z_1)$, $z_3 = f(z_2)$,... Según el valor del parámetro fijo c, la sucesión de puntos z_0, z_1, z_2,... puede

(a) crecer más allá de cualquier límite,
(b) tender hacia un punto fijo (converger),
(c) acercarse cada vez, en el mismo orden y con exactitud creciente, a unos puntos concretos, o
(d) permanecer acotada, pero sin ser constante en el tiempo (caso b), ni periódica (caso c).

El último caso es el temido "caos", que sin embargo no es grave en nuestro contexto.

El conjunto de Mandelbrot es el conjunto de puntos c para los que no se da el caso a. Para decidir si se da o no, habría que aplicar la función f indefinidamente. En la práctica no hace falta tanto (lo que ya proporcionó satisfactorias posibilidades de crear gráficos a los usuarios de ordenadores personales en los años ochenta). Si la sucesión z_j abandona sólo una vez cierto círculo alrededor del origen, con toda seguridad no volverá, ni se necesita, por ende, seguir calculando.

El caso b es relativamente claro: para que un punto z pueda ser límite de nuestra sucesión de puntos tiene que ser un punto fijo de f, esto es, cumplir la ecuación $z = z^2 + c$, y además ser un "punto fijo atractivo": debe "atraer" a los puntos de su entorno de tal manera que una sucesión de puntos que caiga en sus cercanías no tenga más remedio que hundirse en sus brazos. Con ayuda del análisis esta descripción poética se transforma en una simple desigualdad para z: debe hallarse en el interior del círculo de radio 1/2 con centro en el origen. Esto se puede traducir de nuevo en una condición sobre el parámetro c: c tiene que estar en el interior de una cardioide, la "manzana".

En lugar de la clásica función iterativa $f(z) = z^2 + c$, podemos considerar también su generalización $f(z) = z^m + c$, en donde el exponente m puede ser mayor que 2 o incluso negativo. Como resultado se obtienen generalizaciones del conjunto de Mandelbrot donde los puntos que pertenecen al caso b caen en el interior de una epicicloide de $m - 1$ puntas para $m > 2$. Para valores negativos, $m < -1$, resultan hipocicloides.

Los infinitos brotes del cuerpo principal del conjunto de Mandelbrot contienen puntos de comportamiento cíclicamente convergente (caso c). Así, los valores de z_j tienden en un n-ciclo alternativamente a n puntos diferentes, aproximándose a ellos de manera cada vez más exacta. Para $m = 2$ las regiones de convergencia cíclica son secciones circulares contiguas que forman una estructura aproximadamente autosimilar. Para valores superiores de m estas regiones tienen semejanzas cualitativas con las epicicloides; por ejemplo, para $m = 3$, con la cardioide.

Priorizar las políticas del carbono

La administración de Obama necesita una estrategia energética a la altura del ambicioso proyecto de ley sobre el clima

Jeffrey D. Sachs

El pasado mes de junio, la Cámara de Representantes de Estados Unidos aprobó el proyecto de ley de la Ley de Energía Limpia y Seguridad y lo envió al Senado. Este texto legal de 1428 páginas aspira a abordar, de un golpe, las energías renovables y la captación y almacenamiento de carbono (CAC), la energía nuclear, los vehículos eléctricos y la limitación e intercambio de derechos de emisión de carbono, la transmisión de energía, la eficiencia energética y la adaptación al clima. Abarca tanto la visión general como los detalles más nimios.

Pero lo que le falta a este borrador descomedido es priorizar. Para llevar a cabo una reforma energética imprescindible y a nivel mundial no debemos perder de vista el cuadro completo —los sistemas técnicos que marcarán una diferencia importante y duradera— y enredarnos en farragosos detalles.

De las docenas de actuaciones propuestas en el proyecto quizás una media docena suponga una diferencia trascendente. La medida más importante es poner precio al carbono, porque para realizar el cambio a técnicas bajas en carbono es preciso enviar una clara señal a través de la economía. Lamentablemente, cobrar impuestos directos sobre el carbono sería mucho mejor que el farragoso sistema de limitación e intercambio del proyecto de ley de la Cámara. Los políticos detestan la palabra "impuestos" y les gusta repartir permisos de emisiones entre los grupos de interés poderosos. El resultado es un sistema demasiado complicado y un tanto arbitrario, pero aun así es mejor que nada. Por lo menos, las emisiones de carbono tendrán finalmente un precio de mercado sujeto a legislación; además, el Senado todavía está a tiempo de mejorar la ley.

Fomentar la energía nuclear sería probablemente la segunda medida más importante, porque hoy es la fuente de electricidad sin carbono que con mayor facilidad se puede expandir con un coste competitivo. La legislación es ambivalente sobre la energía nuclear; refleja así las continuas divisiones dentro del mundo de los defensores del medio ambiente entre partidarios y detractores acérrimos. Elijamos o no expandir la energía nuclear, China y muchos otros países sin duda recurrirán a ella. EE.UU. también debería; es necesario para una reducción rentable de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Como tercera medida, debería ensayarse la CAC y, si funcionara, habría que aplicarla rápida y abundantemente. La legislación acierta al abogar por esta técnica, aunque muchos ecologistas mantengan una oposición incondicional al carbón. Aun así, como ocurre con la energía nuclear, pese a que los ecologistas le hagan ascos, China, India y otros países seguirán utilizando el carbón con profusión. Por tanto, EE.UU. también lo usará. La clave es asegurarse de que las futuras plantas de carbón utilicen CAC.

Cuarta medida: necesitamos desarrollar el tremendo potencial solar. Es muy probable que la inversión en energía solar a gran escala rinda enormemente dentro de unos años o decenios. Mas, para ello, serán esenciales una estrategia integrada de I + D, tarifas que incentiven la introducción de la energía renovable en la red eléctrica y otras formas de apoyo para llevar ese gran potencial a buen término.

Quinta: hay que darse prisa y sustituir el parque automovilístico con una nueva generación de vehículos eléctricos, como los híbridos enchufables, los propulsados por baterías y los de pilas de combustible. O Norteamérica aprende a producir esos coches de forma competitiva o terminará importándolos de China, Europa y Japón.

Sexta: necesitamos explotar las vastas e incumplidas oportunidades de uso más eficiente del combustible en motores eléctricos, bombillas, electrodomésticos, calefacción y aire acondicionado de las viviendas. Los programas de eficiencia energética de California y Japón durante los pasados 20 años han demostrado los sorprendentes beneficios que se pueden alcanzar, a menudo con gran ahorro para los consumidores.

El proyecto de ley trata de todos estos temas, pero también incluye un sinnúmero de derroches y medidas de cara a la galería. Se continúan apoyando las políticas de biocombustible basado en el maíz, con el que se pierden provisiones de comida y dinero del contribuyente sin efecto apreciable en la reducción de las emisiones de carbono (atribúyanle esta medida a la importancia que le da a Iowa al ser el primer estado que elige delegados para la nominación de candidatos a la presidencia de Estados Unidos).

La Casa Blanca ha dejado hasta ahora al Congreso hacer lo que mejor hace: tocar todos los palillos de modo que no haya grupo de interés que no quede contento, compensado o subsidiado, sin jerarquizar las medidas clave que decidirán el éxito o fracaso de la reforma del sistema energético. La administración ha demostrado de nuevo su hábil tacto político al conseguir que el proyecto de ley pase del Parlamento al Senado. El desafío actual pide un tacto igual de hábil para diseñar y gestionar esas políticas.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

Racionalidad e infinito

Cómo evitar que los dictados de la racionalidad conduzcan al desastre

Gabriel Uzquiano

El infinito no deja de ser una fuente de perplejidad. Los siguientes tres problemas son una muestra de ello. El tercero sugiere cautela a la hora de generalizar al caso infinito normas de racionalidad que funcionan perfectamente en el caso finito.

Empecemos con éste:

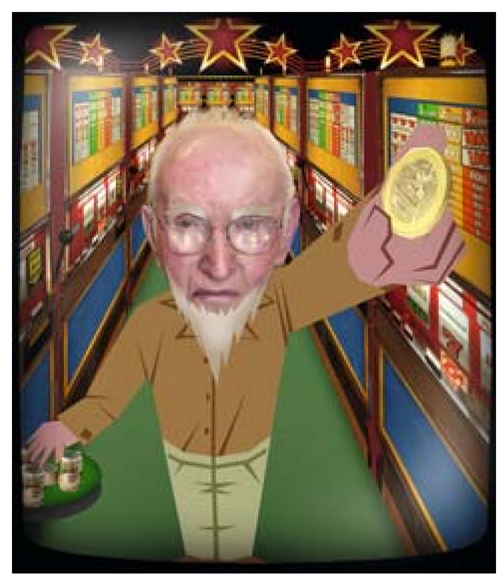
"Matusalén dispone de una eternidad para jugar con una máquina tragaperras. Juega una moneda de euro cada día. La máquina es generosa: siempre se gana. Aunque cuenta con una sola moneda al empezar el juego, el primer día la máquina paga diez euros en monedas de a uno. El segundo día el premio es todavía mayor. Tras introducir una de las diez monedas, la máquina premia a Matusalén con cien euros en monedas de a uno. El tercer día es todavía más afortunado, ya que la máquina le devuelve mil monedas de a uno. Y así durante toda una eternidad.

Nuestro primer problema consiste en averiguar cuántas monedas van a quedarse con Matusalén de manera permanente una vez han llegado a él. ¿Un número infinito de ellas? ¿Un número finito? ¿Ninguna? ¿Siete... o diez... o veintisiete?"

Aunque pueda parecer increíble, todas las opciones permanecen abiertas. Si enumera las monedas que le devuelve la máquina a medida que le van llegando, entonces puede optar por estrategias diferentes dependiendo de cuántas monedas quiera conservar de manera permanente.

Si no quiere que ninguna se quede con él de manera permanente, basta con jugar todas las monedas en el orden en el que llegan: la primera moneda el segundo día, la segunda moneda —que, recordemos, formaba parte de las diez que obtuvo el primer día— el tercer día, la tercera moneda el cuarto día y así sucesivamente.

Si, por el contrario, Matusalén quiere conservar un número infinito de monedas de manera permanente, entonces podría jugar tan sólo aquellas monedas que ocupen un lugar impar en la enumeración. Ya no es difícil encontrar una estrategia para conservar exactamente veintisiete monedas de manera permanente. El segundo día, Matusalén puede jugar la primera moneda. El tercer día puede quedarse con todas las monedas que ocupen un lugar entre el dos y el veintiocho y jugar la moneda que ocupe el lugar veintinueve. El siguiente día puede jugar la trigésima moneda, y así sucesivamente.



No hay duda de que una eternidad es mucho tiempo, incluso para Matusalén. Afortunadamente sabemos cómo acelerar el proceso para que concluya en una hora. Si empezamos a la una en punto, Matusalén podría introducir el primer euro a la una, el segundo euro media hora más tarde, el tercer euro un cuarto de hora más tarde, y así sucesivamente. De ese modo, a las dos en punto habría completado un número infinito de jugadas y podremos plantear un segundo problema:

"En esta ocasión, supongamos que la máquina nunca devuelve monedas que hayan sido jugadas previamente, de manera que sólo genera monedas que no han estado antes en manos de Matusalén. ¿Qué podemos deducir acerca del número de monedas en su poder a las dos en punto? ¿Existe alguna estrategia para conservar un número infinito de euros?"

Igual que antes, el número de monedas que quede con Matusalén dependerá de qué estrategia utilice. Si consiste en jugar todas las monedas en el orden en el que le llegan, se quedará con las manos vacías al final del juego. Si conserva una moneda a las dos en punto, ésta debe formar parte de alguno de los premios concedidos por la máquina. Pero la estrategia que estamos considerando es una bajo la cual toda moneda que le llega a Matusalén es introducida de nuevo en la máquina. Como en esta ocasión la máquina nunca devuelve una moneda que haya sido jugada con anterioridad, ninguna moneda va a poder quedarse con Matusalén al final del juego.

Por otra parte, no es difícil utilizar la estrategia del primer problema para acabar la hora con un número infinito de monedas o cualquier número finito de ellas. Llegó el momento de enunciar el problema más interesante:

"En esta ocasión, la máquina tragaperras ya no es tan desprendida como antes. No sólo recuerda el orden en el que salen las monedas con que premia cada jugada, sino que está programada para premiar una sola de las monedas que permanecen con Matusalén después de cada jugada. Sólo premia aquella que ocupe el primer lugar en el orden en que le llegaron. Como Matusalén lo sabe —y recuerda también en que orden le llegaron las monedas—, tiene una estrategia que garantiza premio jugada tras jugada.

Desafortunadamente para Matusalén, hay todavía otro aspecto en el cual las circunstancias son menos favorables para él de lo que eran antes. Si introduce cualquier otra moneda, no sólo dejará de obtener premio, sino que además la máquina ya no aceptará ninguna otra jugada y el juego habrá cesado.

Por otra parte, no hay nada que obligue a Matusalén a seguir jugando. Al contrario, puede retirarse en cualquier mo-

mento y llevarse todo lo que haya acumulado hasta entonces. Como en el primer problema, los premios van aumentando de manera progresiva: cien euros, mil euros, diez mil euros, y así sucesivamente mientras Matusalén siga introduciendo la moneda adecuada. Como en el segundo problema, la máquina nunca devuelve una moneda que haya estado en manos de Matusalén. Todo va a ocurrir en una hora, entre la una y las dos de la tarde. Sabemos que su primera prioridad es no perderlo todo y que su segunda prioridad consiste en maximizar la ganancia. Nuestro problema se centra en averiguar qué estrategia debería utilizar en esta situación. ¿Hay alguna estrategia para maximizar su ganancia?"

En este caso, la observación crucial estriba en que, a menos que se retire de manera voluntaria tras un número finito de premios, Matusalén va a quedarse con las manos vacías. Recordemos que la máquina nunca devuelve una moneda jugada por Matusalén; por consiguiente, lo mismo que en el segundo problema, a menos que se retire voluntariamente siempre va a encontrar una oportunidad para jugar todas y cada una de las monedas que le llegaron como parte de algún premio, con lo cual ninguna va a quedarse con él de manera permanente.

El problema es que parece difícil acotar el momento adecuado para retirarse. Dado cualquier número finito de jugadas, Matusalén siempre podría encontrar la manera de doblar sus ganancias, incluso aumentarlas de forma exponencial. Parece, por tanto, que Matusalén debe ser cauto a la hora de decidir cómo actuar.

Supongamos que Matusalén delibera sobre qué estrategia adoptar de antemano. Conviene que, una vez adoptada una estrategia, no cambie de idea tras haber empezado a jugar y se deje seducir por la ganancia de una jugada más, ya que, como veremos, ello le conduciría al desastre. Una estrategia posible consiste en jugar la primera moneda y abandonar. Otra, en jugar dos monedas y abandonar. Una tercera, en jugar veintisiete monedas y abandonar. Y así sucesivamente. Una virtud de cada una de estas estrategias es que incluyen el abandono del juego tras un número finito de partidas, con lo cual Matusalén no acabaría con las manos vacías.

Supongamos que Matusalén delibera acerca de si adoptar un plan que incluya jugar la primera moneda. Parece que cualquier plan que incluya esa decisión dará mejor resultado que un plan que no la incluya, ya que bajo este último Matusalén se quedaría con tan sólo diez euros, mientras que cualquier otra estrategia le garantiza un retorno mucho mayor. Parecería seguirse, por tanto, que Matusalén debería adoptar una estrategia que incluya jugar la primera moneda. Este razonamiento parece descartar la primera estrategia concluyentemente. El problema es que el mismo tipo de razonamiento va a descartar la segunda estrategia: Matusalén preferirá cualquier estrategia que incluya jugar la segunda moneda a una que no lo haga. Y así sucesivamente para cualquier estrategia que incluya el abandono tras un número finito de jugadas.

Ahora bien, si Matusalén rechaza todas las estrategias que le permiten quedarse con dinero al cabo de la hora, parece que no le va a quedar opción sino perderlo todo cuando lleguen las dos. Debe haber algún defecto en el razonamiento de Matusalén. Pero, ¿cuál?

Matusalén ha generalizado una manera de razonar que es perfectamente válida en el caso finito. Supongamos que estamos deliberando acerca de qué hacer este próximo sábado. Consideramos un número finito de posibilidades, tres por ejemplo, cada una de las cuales incluye planes sobre qué hacer por la mañana, mediodía, tarde y noche. Supongamos que las tres posibilidades incluyen trasladarnos al centro y permanecer allí el día entero. Si hay un restaurante en el centro que combina mejor con los tres planes que ningún otro, entonces parece obvio que esa debería ser nuestra opción para mediodía. Hagamos lo que hagamos, comer en ese restaurante será mejor que comer en cualquier otro. Dicho de otro modo, ese restaurante domina al resto de planes acerca de qué hacer a mediodía, de manera que la decisión racional consistiría en preferir cualquier plan que incluya el restaurante a uno que no lo haga. Pero la razón por la cual es racional escoger la opción dominante es porque en el caso finito siempre va a haber una utilidad máxima asociada a una u otra opción o conjunto de opciones.

En el caso que nos ocupa, sin embargo, ninguna de las estrategias que Matusalén está considerando tiene utilidad máxima. Dada cualquier estrategia bajo consideración, podemos encontrar otra con la que la ganancia va a ser muchísimo mayor. No es obvio, por tanto, que argumentos de dominancia como los anteriores den lugar a decisiones racionales. Parece que en nuestro caso, lo racional sería preferir alguna estrategia no dominante —y, por tanto, no óptima— de manera que Matusalén no se quede con las manos vacías. Matusalén debería decidir adoptar un número de jugadas suficientemente grande como para que el premio sea sustancioso y abandonar tras las mismas sin pensar siquiera que ocurriría si jugara tan sólo una moneda más.

¿Qué ocurre si Matusalén no adopta un plan de antemano y decide tomar cada decisión de manera individual? A la una y media llega el momento de la primera decisión. Matusalén se enfrenta a tres opciones:

- jugar la moneda que garantiza un premio de cien euros
- abandonar el juego llevándose diez euros
- jugar cualquier otra moneda y acabar el juego con nueve euros.

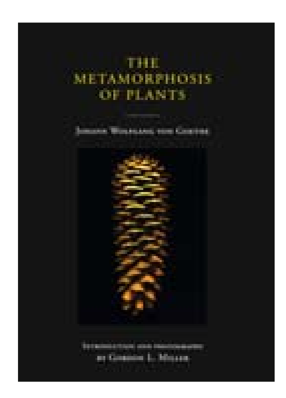
Parece obvio que la utilidad de la primera acción es mucho mayor que la de esas otras dos. Entre las tres, lo racional sería escoger la primera opción. El problema es que la misma deliberación hará que Matusalén, si es racional, prefiera jugar la siguiente moneda con premio a cualquiera de las otras dos opciones. Y así sucesivamente. Paradójicamente, una sucesión infinita de decisiones perfectamente racionales van a conducir a Matusalén al desastre.

Pero, ¿qué error está cometiendo Matusalén al dejarse llevar por los dictados de la racionalidad? Acabamos de ver que, a diferencia del caso finito, una sucesión infinita de decisiones individuales perfectamente racionales y justificadas puede dejarnos con las manos vacías. Lo mejor que uno puede hacer en el caso infinito es optar de antemano por un plan que no sea óptimo pero que al menos garantice algún retorno. Además, se debe resistir la tentación de variar el plan una vez ha empezado el proceso a fin de obtener un retorno mayor. De cualquier otra manera, uno acabará con las manos vacías.

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de Oxford.

¿Quiere saber más?

Frank Arntzenius, Adam Elga y John Hawthorne discuten una batería de problemas similares en "Bayesianism, Infinite Decisions and Binding", en *Mind*, vol. 113, págs. 251-283; 2004.



JOHANN WOLFGANG VON GOETHE. THE METAMORPHOSIS OF PLANTS.

Edición preparada por Gordon L. Miller. The MIT Press; Cambridge, Mass. 2009.



NATUR UND KULTUR. BIOLOGIE IM SPANNUNGSFELD VON NATURPHILOSOPHIE UND DARWINISMUS.

Coordinado por Michael Kaasch & Joachim Kaasch. VWB—Verlag für Wissenschaft und Bildung; Berlín, 2009.

Goethe

y la biología romántica

El nombre de Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) se asocia a menudo al de Friedrich Wilhelm Josef Schelling, Johann Gottfried von Herder y Carl Gustav Carus en el marco de la biología romántica, a caballo entre el siglo XVIII y el XIX. Nacido en Frankfurt am Main, Goethe estudió leyes en las universidades de Leipzig y Estrasburgo, con esporádicas incursiones en las ciencias naturales y medicina. Se licenció en derecho en 1771. A los 26 años, entró en la corte de Weimar al servicio del duque Carlos Augusto. Desde ese puesto empezó el estudio sistemático de la naturaleza, sin abandonar su función burocrática, que, antes bien, le facilitó la familiaridad con los tres reinos de la naturaleza. Con el romanticismo guardaban relación los conceptos de genio y "los ojos del espíritu", defendidos por Goethe, aunque subraya la importancia decisiva de la observación directa. Sin dejar de compartir postulados de la *Naturphilosophie* de Schelling, no se sintió inclinado por el núcleo central de ésta, la idea de escala de los seres.

Se estrena en el campo de la investigación morfológica con un estudio sobre el intermaxilar, hueso de la mandíbula superior que encontramos en todos los vertebrados dotados de cráneo óseo. (Existe el manuscrito, de 1784.) Describe la presencia del hueso en la morsa y en el hombre, lo que le permite sustentar la "ley del equilibrio": todo incremento de desarrollo de una parte implica el menoscabo, de idéntica proporción, en otras. De esa ley arranca para declarar que la reducción del intermaxilar en la morsa se halla ligado a un crecimiento excepcional de los caninos y los maxilares. Los trabajos sobre el intermaxilar le ofrecieron también la ocasión para elaborar la noción de tipo, crucial en su biología. El concepto refleja una propiedad fundamental de la naturaleza, a saber, su unidad.

Se interesó muy pronto por la botánica, mientras disfrutaba de los pasajes de Jean-Jacques Rousseau consagrados a esa disciplina. Buscaba la *Urpflanze*, la planta prototípica, similar al tipo osteológico, entrevisto en su estudio intermaxilar. En esta ocasión reconducía la diversidad de órganos de la planta a una forma única y fundamental. Goethe se sintió fascinado por la estructura progresiva de las hojas de distintas plantas, empezando por el palmito (*Chamaerops humilis*), del Jardín Botánico de Padua, y luego el hinojo (*Foeniculum vulgare*), de Sicilia. La contemplación del palmito con hojas simples en la base, acabadas otras en abanico y, por fin, en brácteas alrededor de la inflorescencia le induce a sospechar la transformación progresiva de una forma en otra. Fue en Palermo donde perfiló su teoría sobre la hoja, auténtico núcleo de la forma vegetal. Desde el comienzo hasta el final, la planta no es más que hoja. Al proceso a través del cual la hoja inicial va adquiriendo sucesivamente la forma de cotiledón, hojas del tallo, sépalos, pétalos, pistilo, estambres, etcétera, lo llama metamorfosis de las plantas. Esas ideas trenzarán su *Intento de explicación de la metamorfosis de las plantas,* publicado en la pascua de 1790. Organizado a la manera linneana en una serie de 123 párrafos numerados, su tamaño mínimo engaña sobre la importancia de su contenido, que marcó un punto de incidencia y puso la semilla de una revolución en el pensamiento que transformaría la ciencia biológica del siglo XIX. Goethe distingue tres tipos de metamorfosis: normal o progresiva, anormal o regresiva y accidental (producida por causas externas, principalmente insectos).

Como hemos avanzado, el proceso metamórfico cursaba en doble dirección: podríamos considerar el sépalo como la contracción de una hoja del tallo o la hoja del tallo como expansión del sépalo; el estambre como pétalo contraído o el pétalo como estambre expandido. La estructura foliar puede verse afectada por la sequedad o humedad relativas del medio, así como el distinto piso en que se encuentre. Un suelo con excesiva carga de nutrientes puede retardar la floración. Andando el tiempo especificaría dos aspectos de ese poder ordenado y productivo de la naturaleza: la intensificación y la polaridad. Por *intensificación* entendía una pulsión creciente hacia la plena expresión en fenómenos físicos, empíricos, del potencial inherente en la idea subyacente de *Urphenomen.* Goethe encontró pruebas de *intensificación* en la metamorfosis de una planta desde las hojas del tallo más simples y rudas hasta los pétalos más finos y coloreados y los órganos de la reproducción especializados. La ejecución de ese proceso requería el refinamiento progresivo de la savia a través de sucesivas estructuras del vegetal. El concepto emparentado de *polaridad* implicaba una interrelación dinámica y creadora de opuestos. En la metamorfosis de las plantas, la polaridad es más evidente en las fuerzas alternantes de expansión y contracción. En el párrafo 73 describió las etapas de ese proceso polar: expansión

desde la semilla hasta las hojas del tallo; contracción desde las hojas del tallo en los sépalos del cáliz, expansión de los sépalos en pétalos, contracción de los pétalos en pistilos y estambres, expansión de los órganos de la reproducción en fruto y, completando el ciclo, contracción de fruto en semilla. A través de esos pasos, la naturaleza cumple la obra eterna de propagar la vegetación.

Nada tenía, pues de particular, que se involucrara en el debate entre Etienne Geoffroy Saint-Hilaire y Georges Cuvier. Proponía Goethe emplear la expresión unidad de tipo en vez de plan (o plano estructural) y no considerar como determinante ni la forma de un órgano (a la manera de Geofroy) ni su función (como Cuvier), sino tener en cuenta la acción recíproca de ambas y utilizar el método genético para ilustrar las analogías orgánicas. Las especies que menciona en su ensayo aparecen ilustradas en esta edición. (Los intereses científicos de Goethe abarcaron desde la geología y meteorología hasta la zoología y especialmente la física, campo en el que ahondó en el estudio de la óptica fisiológica con su tratado *Teoría del color*, publicado en 1810.)

La valoración de la obra botánica de Goethe llegó ya en la primera mitad del siglo XIX (*Natur und Kultur. Biologie im Spannungsfeld von Naturphilosophie und Darwinismus*). Alexander von Humboldt le dedicó una obra; en 1853, Hermann von Helmholtz ponderaba su doctrina de la metamorfosis, elogio que volvió a reiterar en 1892, cuando declaraba que la teoría de Goethe había ayudado a perfilar la biología del XIX. Cada uno por su parte, Geoffroy Saint-Hilaire y Auguste Pyrame de Candolle, desarrollaron una forma peculiar de biología trascendental, idealista, durante las primeras décadas del siglo. En Inglaterra, hacia mediados del siglo XIX Richard Owen aportó ideas de arquetipo en una teoría robusta de la evolución que él defendió con fuerza frente a una visión darwinista en la que la evolución procede mediante fuerzas meramente materiales. Al otro lado del Atlántico, Ralph Waldo Emerson y Henry David Thoreau abrazaron con entusiasmo la doctrina de *La metamorfosis de las plantas*.

La obra naturalista de Goethe tendió puentes con las humanidades. Cierto es que, desde los presocráticos y a lo largo de muchos siglos, la naturaleza y el hombre se encontraban estrechamente interconexos, siendo una complemento del otro. Tuvo ello que ver con el prestigio del mundo natural, una de las preocupaciones dominantes en la Ilustración del XVIII. Participaron la administración, los párrocos y los terratenientes. Una naturaleza domesticada o no. Dentro del contexto de la percepción de la naturaleza como expresión del orden divino del cosmos, la selva forma parte del orden general. Una revalorización estética de lo salvaje se produjo en el siglo XVIII a través de las teorías sobre lo sublime de Burke y Kant. Otra forma de fomentar el afecto por el mundo vegetal en particular fue la correspondencia, como la que mantuvieron Goethe, Kaspar Stenberg (1761-1838) y Christian Gottfried Nees von Esenbeck (1776-1857). Sus ideas se cruzaron con la filosofía de Friedrich Wilhelm Josef Schelling (1775-1854). La filosofía natural romántica comprometió a todas las disciplinas científicas. Propio de esa visión es romper con el enfrentamiento del yo ante la naturaleza, para constituir uno y otra una sola entidad; compete a la razón poner orden en esa naturaleza de la que forma parte. La figura común, constituida por el tipo, serviría de plataforma, se apoyaría en los conceptos de *nisus formativus* y de *vis essentialis*, que explicarían el proceso de despliegue de los órganos del individuo.

La postrera floración de la obra de Goethe, desarrollada por Humboldt, daría origen a la ecología, una noción hoy deturpada por la política. Sabido es que la aparición del término ecología en la historia de la biología se halla íntimamente relacionado con la obra *Generelle Morphologie der Organismen* (1866) de Ernst Haeckel (1834-1919), defensor infatigable del evolucionismo darwinista a ultranza. La ecología en cuanto disciplina biológica no alcanzó mayoría de edad hasta la segunda mitad del siglo XX. Pero hubo avances firmes desde mucho antes. Friedrich Dahl (1856-1929) publicó en 1893 los resultados de su estudio sobre las comunidades bentónicas del curso inferior del Elba. Dahl creó los primeros métodos cuantitativos de cómputo. Trabajaba por entonces en la estación marina de Kiel, fundada por Víctor Hensen. Desde los años veinte, Arthur Hagmeier, que llegaría a dirigir la Estación Biológica de Helgoland, comenzó el estudio sistemático del mar de Wadden. Hensen no sólo fue el fundador de la investigación cuantitativa sobre el plancton pelágico, sino también de los métodos bentónicos.

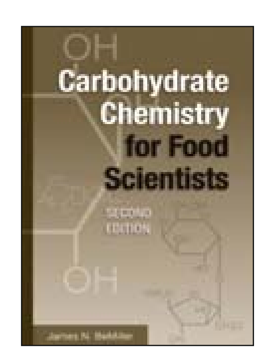
Interesante también es el curso parejo de la citología. Para Edmund Beecher Wilson (1856-1939), autor de un manual influyente en el primer tercio del siglo XX, la célula representaba la unidad fundamental de la organización del ser vivo. Un movimiento creciente a favor del holismo favorecía visiones de las células como subdivisiones de los tejidos o, por el extremo opuesto, como agregados secundarios de unidades subcelulares. Los mismos expertos se sentían incapaces de aportar una respuesta universalmente aceptada a la cuestión fundamental de qué sea una célula. En la primera edición de su manual (1896), Wilson no sólo adoptó una definición general, sino que ideó incluso un esbozo de la célula, un diagrama de la célula. En la tercera edición (1925), el diagrama sufrió un ligero retoque. Esas dos imágenes no representan el resultado de observaciones microscópicas, sino que compendian sus concepciones teóricas.

Entre los investigadores que mantuvieron vivas las influencias positivas de la *Naturphilosophie*, de Johann Wolfgang von Goethe a Charles Darwin, estaba el botánico y microbiólogo Ferdinand Cohn de Breslau (1828-1898). Su ejemplo evidencia el desarrollo de un botánico que gracias a la influencia de la *Naturphilosophie*, alcanzó cotas altísimas en el campo de la investigación natural. Cohn había trabajado en la evolución del microcosmos antes incluso de la obra de Darwin. Aceptó prestamente la tesis evolutiva de Darwin y se apoyó en ella para su trabajo científico. Crítico, empero, con Darwin, ensalzó la influencia de Goethe en el avance de la botánica. En el siglo XIX se adquirió el fundamento conceptual para la comprensión de la naturaleza *sub specie evolutionis* y el de su historicidad. Precondición para una interpretación de la naturaleza de Tierra inmersa en una larga historia era superar la cronología literal bíblica, calculada en unos 6000 años de acuerdo con la cronología del Antiguo Testamento. Resultó determinante para ello el desarrollo de la geología. Hutton, Lyell y Darwin hilvanan esos hitos. A una Tierra joven le reemplazó una Tierra añosa. Se enfrentaron dos hipótesis principales —el uniformitarismo (Hutton y Lyell) y el catastrofismo (Cuvier y sus sucesores)— que terminaron por propiciar el adve-

nimiento del evolucionismo (Darwin). William Thomson (lord Kelvin) polemizó contra el uniformitarismo y darwinismo con argumentos tomados de la termodinámica sobre la edad de la Tierra. La controversia terminó cuando se descubrió la radiactividad natural. Escasa atención se había prestado hasta ahora al trabajo del lingüista alemán August Schleicher (1821-1868), quien se adelantó a Darwin en la filogénesis de los lenguajes.

Una línea que deriva directamente de la ejecutoria de Goethe tiene que ver con la fundación de las sociedades naturalistas. La *Wetterauische Gesellschaft für die gesamte Naturkunde zu Hanau*, creada en 1808, fue la más antigua de las sociedades de historia natural de Hesse. La *Rheinische Naturforschende Gesellschaft* (RNG) representa el tipo tradicional de Sociedades de Investigación en Historia Natural, fundadas a iniciativa de ciudadanos sin ninguna relación con las universidades ni poder político. Los fines de la RNG, según estatutos de 1834, incluían la promoción del conocimiento relacionado con la historia natural. La investigación de un grupo de malacólogos en la Sociedad de Investigación de Historia Natural Senckenberg (*Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft*) en Frankfurt desde las postrimerías del decenio de 1860 hasta los ochenta nos revela cómo los aficionados ocuparon un lugar de excelencia en el panorama científico contemporáneo; los malacólogos de Frankfurt se concentraron en la normalización del sistema de clasificación de los moluscos de agua dulce de Europa y Africa. Gracias a su trabajo pudo avanzar la ciencia, tras el fiasco de los malácologos franceses que conformaban la *nouvelle école*. Hasta 1880 se fundaron siete sociedades más en las ciudades de Marburg, Frankfurt am Main, Wiesbaden, Giessen, Kassel, Offenbach, Fulda y Darmstadt. La fundación de la *Senckenbergische Naturforschende Gesellschaft zu Frankfurt* recibió la influencia de la Sociedad de Wetterau y de Johann Wolfgang von Goethe.

Luis Alonso



CARBOHYDRATE CHEMISTRY FOR FOOD SCIENTISTS, 2.ª EDICION,

por James N. BeMiller. AACC International; St. Paul, 2007.

Hidratos de carbono

Para futuros técnicos en alimentos

Este breve tratado de James BeMiller sobre los glúcidos de los alimentos tiene la considerable ventaja de la concisión. Puede ser un buen libro de texto y referencia para los tecnólogos de alimentos, porque ha conseguido presentar de forma ordenada y didáctica un panorama bastante completo de las principales características físico-químicas de los glúcidos presentes en los alimentos. El principal inconveniente para el lector avanzado es una consecuencia de la extensión del campo de estudio y la limitada profundidad con que pueden tratarse los distintos temas. Se trata, por tanto, de un libro enfocado al estudiante o al no experto, que necesitan tener una idea general de las características principales de los glúcidos de los alimentos y de su efecto sobre la estructura y funcionalidad de éstos.

El enfoque del libro es clásico: definición y descripción de monosacáridos, oligosacáridos y polisacáridos, con una breve descripción de sus reacciones principales desde el punto de vista de la química de los alimentos, con sólo alguna breve pincelada de bioquímica o nutrición. El objetivo del libro son los glúcidos de los alimentos, no su función nutricional o los mecanismos de su síntesis o degradación biológica. Los capítulos dedicados a los polisacáridos y a la relación entre estructura y propiedades están descritos con mayor detalle; reflejan mejor la importancia de estos componentes alimentarios y su función nutritiva así como estructural en buena parte de los alimentos naturales y preparados. Esa parte se completa con una serie de capítulos dedicados a polisacáridos de "fibra": gomas, mucílagos, pectinas y otros compuestos de origen mayoritariamente vegetal que se utilizan como aditivos en la preparación de un gran número de alimentos.

El libro está ampliamente ilustrado con fórmulas y gráficos, así como algunas fotografías. Contiene una serie de recuadros en los que añade comentarios o resume aspectos singulares. Sin embargo, hay una amplia variación de los estilos y tamaños de las fórmulas presentadas; algunos de los esquemas son excesivamente simplistas. Da la impresión de que el texto se ha ido construyendo de modo paulatino, faltando un último ajuste uniformizador de conjunto. El relativo desorden interno de los capítulos contrasta con una buena organización del libro y una adecuada sistematización global de los temas.

Además del análisis de la química de los glúcidos alimentarios, el autor hace breves incursiones descriptivas sobre algunos temas de actualidad, que inciden sólo de forma tangencial en la química de los glúcidos (la generación de acrilamida en la preparación de algunos alimentos, por ejemplo). Sin embargo, centrar un capítulo en los edulcorantes artificiales no está justificado en un libro sobre la química de los glúcidos. La inclusión de un capítulo sobre la nutrición glucídica y la utilización de la fibra como complemento alimentario constituye, junto con la descripción parcial de los edulcorantes artificiales, la parte más débil del libro, ya que está escrita sin convencimiento, con escasa profundidad y aún más superficial conocimiento de los aspectos puramente nutricionales. La utilización energética de algunos tipos de fibra alimentaria por el efecto de la biota escapa totalmente del enfoque de un libro que, por otra parte, está bastante logrado en su parte más química y descriptiva.

En conjunto, se trata de un libro útil para el estudiante de ciencia de los alimentos, no tanto como libro de referencia, y es francamente mejorable en sus breves incursiones fuera del campo especificado en el título del libro.

Marià Alemany
Catedrático de Nutrición y Bromatología
Facultad de Biología,
Universidad de Barcelona



Recargar el cerebro,

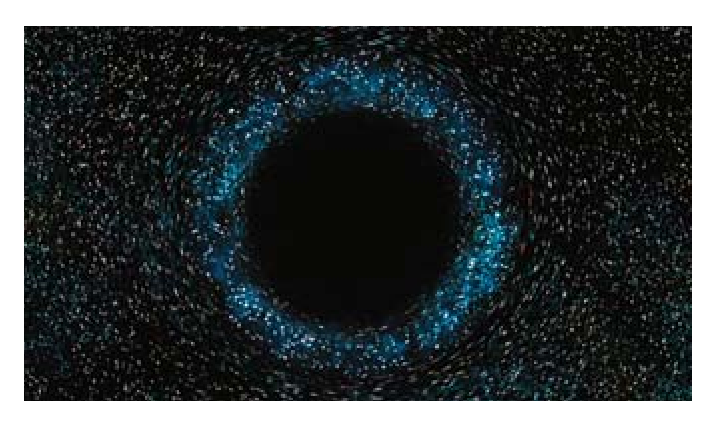
por Gary Stix

¿Bastará ingerir una píldora con el desayuno para mejorar la concentración y la memoria, sin detrimento de la salud a largo plazo?

Estrellas negras,

por Carlos Barceló, Stefano Liberati, Sebastiano Sonego y Matt Visser

Los efectos cuánticos quizá previenen la formación de agujeros negros y, en lugar de ello, dan lugar a unas estructuras densas denominadas estrellas negras.





Ciudades perdidas de la Amazonía,

por Michael J. Heckenberger

La selva tropical del Amazonas no es tan salvaje como parece.

El ribosoma y la traducción genética,

por Daniel A. Colón Ramos y Antón Vila Sanjurjo

El alto grado de conservación del ribosoma en todos los organismos indica que su temprana aparición fue crucial para el desarrollo de la vida. Además de traducir la información genética en proteínas, participa en la regulación de la expresión génica.

Privacidad e internet cuántica,

por Seth Lloyd

Gracias a algunas de las más extrañas leyes de la física, tal vez podamos algún día buscar o navegar por la Red sin que nadie vaya recopilando datos nuestros.

